

論文2002-39SD-10-7

아크 유도 장주기 광섬유 격자의 공진 파장 특성

(Resonant Wavelength Characteristics of Arc-Induced Long-Period Fiber Gratings.)

鄭 澈 *, 李 鎬 俊 *

(Chul Chung and Hojoon Lee)

요 약

일반 광섬유에 아크 방전을 인가하여 코어 및 클래딩의 직경 변화를 발생시켜 장주기 격자를 제작하는 방법이 소개되었다. 본 연구에서는 매우 약한 아크를 반복적으로 발생시켜 광섬유에 매우 약한 변형을 수 차례 주어 광섬유 격자 직경을 정밀하게 조절 할 수 있는 방법을 사용한 중첩 장주기 광섬유 격자 제조 방법을 제안하였다. 또한 위상정합 조건을 이용하여 장주기 광섬유 격자의 직경 변화에 따른 공진 파장의 변화를 이론적으로 유도하였으며, 실험을 통해 확인하였다. 또한 실험 결과 아크 유도 광섬유 격자의 주기와 공진 파장과의 관계가 위상 정합 조건과 일치하는 것을 확인하였으며, 온도 변화에 따른 공진 파장의 변화를 측정하고 기계적 강도를 측정하였다.

Abstract

A fabrication method of long-period fiber gratings (LPFGs) that can be easily controlled resonance wavelength and losses is introduced. We used the superposition method that core and cladding diameter are modulated by applying a number of small electric-arc to the normal fiber. We derived an equation of resonance wavelength change according to core diameter variation using the phase matching condition and showed the results are well matched with experiments. The measured resonant wavelengths of arc-induced superposition LPFGs according to grating period are well coincident with that of phase matching condition. The resonance wavelength is measured for the temperature changes and a slight mechanical strength degradation of arc-induced LPFGs is observed by increasing arc times.

Key Words: long-period fiber grating, arc-induced superposition, mode coupling.

I. 서 론

장주기 광섬유 격자(long-period fiber grating)는 광 증폭기(Erbium doped fiber amplifier)의 이득 평탄화 필터^[1]로 사용하거나, 광섬유 센서 분야에서 파장 변별

기^[2,3]로 사용하며, 온도 센서^[4] 및 편광 측정^[5] 등에 응용할 수 있기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다. 장주기 광섬유 격자는 190~250 nm의 영역의 자외선 레이저와 진폭마스크를 이용하여 광민감성 광섬유에 제작된다.^[6] 이 방법은 고가의 레이저와 광민감성 광섬유를 사용하여야 하며, 광민감성을 향상시키기 위해서는 수소처리가 필요하며, 고온에서 생성된 격자가 지워지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 아크 방전을 이용하여 광섬유에 마이크로 벤딩을 주는 방법^[7] 및 CO₂ 레이저를 이용한 방법 등이 소개

* 正會員, 湖西大學校 情報通信工學科
(Dept. of Information-communication Engineering,
Hoseo University)
接受日字:2001年5月16日, 수정완료일:2002年10月5日

되었다. CO₂ 레이저를 사용하는 방법은 주기적으로 코어에 변형을 주는 방법^[6]과 잔여 압력을 해소하는 방법이 있다.^[9,10] 아크 방전과 CO₂ 레이저를 이용한 방법의 장점은 진폭마스크를 사용하지 않고 이송장치를 이용하여 격자 주기를 조절할 수 있고, 고온에서도 격자가 지워지지 않는다는 것이다. 아크로 광섬유에 마이크로 벤딩을 생성하여 장주기 격자를 제작하는 방법은 코어 모드와 비대칭모드인 LP₁₁, LP₁₂, LP₁₃ 모드 등이 결합하지만, 비 대칭성 때문에 편광 의존성을 갖는 단점을 가지고 있다.^[7] 아크로 광섬유 직경 변화를 유도하는 장주기 격자는 제작이 간단하고 고온에서 지워지지 않는 특성 때문에 많은 연구가 이루어 졌다.^[11~15] 최근에 아크로 유도된 장주기 격자는 1,190℃에서 30분간 유지시켰을 때에도 특성 저하를 보이지 않는다는 실험 결과가 보고되었다.^[14,15]

아크를 이용하여 광섬유 직경 변화를 유도하는 방법을 사용하여 장주기 광섬유 격자를 생성 시 한 격자에 대하여 상대적으로 매우 강한 에너지를 1회 광섬유에 인가하여 광섬유의 직경 변화를 발생시켰으나^[12~15] 이때 광섬유 직경 변화의 조절이 매우 어렵기 때문에 원하는 특성으로 재현성 있게 장주기 격자를 제작하기가 매우 어렵다. 본 논문에서는 매우 약한 아크를 반복적으로 인가하여 광섬유에 매우 약한 변형을 수 차례 주어 격자 직경을 정밀하게 조절 할 수 있는 아크 유도 중첩(arc-induced superposition) 장주기 격자를 제안하였다. 또한 본 논문에서는 위상 매칭 방법으로 광섬유 직경 변화에 의한 공진 파장의 변화를 이론적으로 유도하고 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 실험 결과를 비교하였다. 위상정합 조건이 아크유도 장주기 광섬유 격자에서도 성립하는 것을 확인하기 위하여 격자 주기와 공진 파장과의 관계를 실험을 통해 측정하였고, 온도에 의한 장주기 격자의 공진 파장 이동 특성과 기계적 파괴 강도 특성을 측정하였다.

II. 직경 변화로 생성된 장주기 격자에 대한 이론

자외선 레이저를 사용한 광섬유 격자 제작 방법은 자외선 레이저와 진폭 마스크를 사용하여 제작하며, 자외선에 의해 굴절률이 변화되는 광민감성 광섬유를 사용한다. 광민감성 광섬유는 자외선 영역의 빛에 반응하

여 굴절률 변화가 발생하며, 진폭마스크 주기에 따라 장주기 광섬유 격자 주기를 다르게 할 수 있다. 그림 1(a)는 자외선 레이저를 이용한 굴절률 변화로 생성된 장주기 광섬유 격자의 형태를 나타내고 있다.

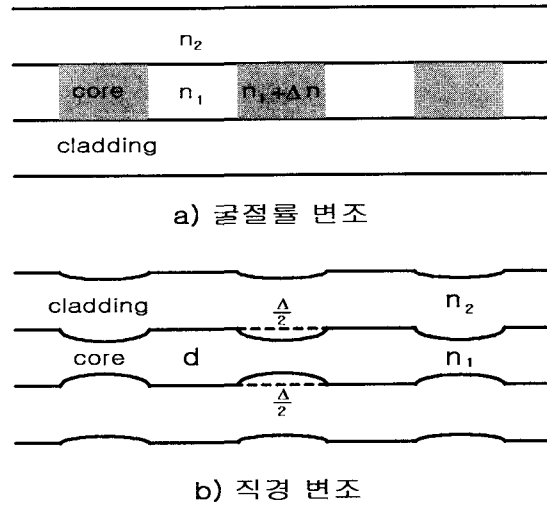


그림 1. 광섬유의 굴절률 변화 및 직경 변화에 의한 장주기 격자의 비교
Fig. 1. Comparison of long period grating between index and diameter modulation.

본 연구에서 사용한 광섬유의 코어 및 클래딩의 직경 변화로 생성된 장주기 광섬유 격자의 형태는 그림 1(b)와 같다. 광섬유가 장착된 된 홀더를 이송장치에 의해 격자 주기만큼 이동시켜준 후 전극에서 방전시키고, 이것을 반복하여 직경 변화에 의한 장주기 광섬유 격자가 제작된다. 이 방전 시간은 마이크로컨트롤러를 통해 조절될 수 있으며, 아크 시간에 따라 직경 변화를 조절할 수 있다.

광섬유가 계단형 광섬유를 사용하고, 코어의 굴절률이 균일하게 변화되었다고 가정할 때, 코어 굴절률 변화 δn_1 에 대한 코어의 실효굴절률 변화 $\delta n_{eff,co}$ 는^[16]

$$\begin{aligned} \delta n_{eff,co} &= b \frac{n_1}{n_{eff,co}} \delta n_1 + \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_{eff,co}} \delta b \\ &= \frac{n_1}{n_{eff,co}} \Gamma \delta n_1 \end{aligned} \quad (1)$$

이 되고, 여기서 $b = (n_{eff,co}^2 - n_2^2) / (n_1^2 - n_2^2)$ 는 정규화 전파상수, n_1 과 n_2 는 코어와 클래딩의 굴절률이고, Γ

는 제한 인자(confinement factor)이다.^[17]

위상 정합 조건 $\lambda = [n_{eff,co}(\lambda) - n_{eff,cl}(\lambda)]\Lambda$ 으로 부터 격자 축 방향에 대한 코어의 평균 실효굴절률 변화 $\delta n_{eff,co}$ 와 클래딩 모드의 평균 실효 굴절률 변화 $\delta n_{eff,cl}$ 가 발생함에 따라 변화되는 공진 파장을 λ_{max} 로 정의하면^[18]

$$\lambda_{max} = \lambda_{res} \left[1 + \frac{\delta n_{eff,co} - \delta n_{eff,cl}}{n_{eff,co} - n_{eff,cl}} \gamma \right] \quad (2)$$

이고, 여기서 λ_{res} 은 실효 굴절률이 변화되기 전의 공진 파장을 나타내며

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda}}{n_{eff,co} - n_{eff,cl}} \\ &= \frac{\frac{d\lambda_{res}}{\lambda_{res}}}{\frac{d\Lambda}{\Lambda}} \end{aligned} \quad (3)$$

이 된다. 식(3)에서 Λ 는 격자의 주기이고, γ 는 격자 주기율의 변화에 대한 공진 파장 변화율을 나타내며, 파장 분산의 정도를 표시하고, $\delta\lambda_{max}/\delta n_1$ 의 부호를 결정하는 인자이다. 저차 모드에서는 양의 값을 가지며 고차 모드에서는 음의 값을 갖는다.^[16,18]

자외선으로 장주기 격자를 제작시에 $\delta n_{eff,cl}$ 은 코어 굴절률 변화의 결과로써 발생되지만 이 값은 영에 매우 가깝기 때문에 무시가능하다.^[18] 식 (1)을 식 (2)에 대입하면

$$\lambda_{max} = \lambda_{res} \left[1 + \frac{\frac{n_1}{n_{eff,co}} \Gamma \delta n_1}{n_{eff,co} - n_{eff,cl}} \gamma \right] \quad (4)$$

가 된다. 식(4)는 광섬유 코어의 굴절률 변화에 따른 장주기 격자의 공진 파장 변화를 나타낸다.

아크에 의하여 광섬유 직경변화를 주어 광섬유 격자를 제작할 때, 격자 축 방향에 대한 평균 광섬유 반경의 변화 δa 에 대한 코어 모드의 실효 굴절률 변화 $\delta n_{eff,co}$ 는 b의 정의 식을 $\delta n_{eff,co}$ 와 δb 에 대하여 편미분하여

$$\delta n_{eff,co} = -\frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_{eff,co}} \delta b \quad (5)$$

얻을 수 있으며, 또한 분산 방정식과 정규화 주파수의

정의식 $V = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 을 각각 편미분하여,

$$\delta b = -\frac{b}{V} \frac{2J_l^2(W\sqrt{1-b})}{J_{l-1}(W\sqrt{1-b})J_{l+1}(W\sqrt{1-b})} \delta V \quad (6)$$

$$\delta V = V \frac{\delta a}{a} \quad (7)$$

을 얻을 수 있으며, l 은 대칭적인 모드 수이다. 식 (6)과 (7)을 식 (5)에 대입하여 직경 변화에 의한 코어 모드의 실효 굴절률 변화를

$$\delta n_{eff,co} = -\frac{n_1^2 - n_{eff,co}^2}{n_{eff,co}} \xi_{l,co} \frac{\delta a}{a} \quad (8)$$

와 같이 얻을 수 있다. 여기서

$$\xi_l = \frac{K_l^2(W\sqrt{b})}{K_{l-1}(W\sqrt{b})K_{l+1}(W\sqrt{b})} \quad (9)$$

이다.^[17] 아크로 유도된 장주기 격자의 경우에는 클래딩의 반경도 코어의 반경과 같이 변화하기 때문에 ($\delta a/a = \delta d/d$) $\delta n_{eff,cl}$ 을 고려해야한다. 동일한 방법에 의하여 광섬유 클래딩 반경 d의 변화 δd 에 대한 $\delta n_{eff,cl}$ 은

$$\begin{aligned} \delta n_{eff,cl} &= -\frac{n_2^2 - n_3^2}{2 n_{eff,cl}} \delta b \\ &= -\frac{n_2^2 - n_{eff,cl}^2}{n_{eff,cl}} \xi_{l,cl} \frac{\delta d}{d} \end{aligned} \quad (10)$$

이 되고, 여기서 $n_3=1$ 는 공기의 굴절률이다. 식(8)과 (10)에서 실효 굴절률은 파장에 대한 함수이며, 재료 분산과 구조 분산에 기인하며 여기서 주된 분산 성분은 구조분산이다. 코어(LP_{0l})와 클래딩(LP_{0l+m}) 모드의 실효 굴절률은 weakly guiding 근사에 의해 구할 수 있고, $m \geq 5$ 일 때 정확한 클래딩 모드의 실효 굴절률과 LP_{0l+m} 모드 실효 굴절률 차이가 $< \pm 10$ nm 정도로 작으므로 근사가 사용된다.^[18] 모드 결합이 고차모드로 진행됨에 따라 양의 기울기가 증가되고 결국 음의 기울기가 됨을 알 수 있다. 식 (8)과 (10)을 식(2)에 대입하면

$$\lambda_{max} = \lambda_{res} \left[1 + \frac{\frac{n_1^2 - n_{eff,co}^2}{n_{eff,co}} \xi_{l,co} - \frac{n_2^2 - n_{eff,cl}^2}{n_{eff,cl}} \xi_{l,cl}}{n_{eff,co} - n_{eff,cl}} \gamma \frac{\delta a}{a} \right] \quad (11)$$

이 된다. 식 (11)은 광섬유의 반경 변화에 대한 공진

파장의 변화를 나타낸다.

장주기 격자의 온도의 변화에 의한 공진 파장 변화는 온도 변화에 의한 격자 주기의 변화 및 실효 굴절률의 변화에 의해 발생되며 식 (12)와 같이 표현된다. 장주기 광섬유 격자의 온도에 따른 파장 변화는 온도 변화에 의해 발생하는 격자 주기의 영향 보다 광섬유의 코어 및 클래딩의 실효 굴절률이 변화에 의존하게 되고, 식(12)와 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.^[19]

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_{res}}{dT} &= \frac{d\Lambda}{dT} (n_{eff,co} - n_{eff,cl}) \\ &\quad + \Lambda \left(\frac{dn_{eff,co}}{dT} - \frac{dn_{eff,cl}}{dT} \right) \\ &\approx \Lambda \left(\frac{dn_{eff,co}}{dT} - \frac{dn_{eff,cl}}{dT} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

자외선 레이저를 이용하여 제작된 장주기 격자의 경우 온도의 변화에 의해 발생하는 공진 파장 변화는 광섬유 코어 물질의 온도 변화에 따른 실효 굴절률의 변화로 인해 발생된다.

III. 직경변화 장주기 격자 실험 및 고찰

광섬유 직경 변화를 이용한 장주기 격자를 제작하기 위한 장치 구성도는 그림 2와 같다. 광섬유의 변형을 발생시키기 위해 모터를 연결한 이송장치, 전극, 광섬유 고정장치, 고전압 발생장치와 분동을 이용하였다. 광섬유의 피복을 제거한 광섬유를 지면에 수직방향으로 세우고 광섬유 지지대로 고정하였다. 고정된 광섬유의 아래 쪽에 분동을 매달아 광섬유에 일정한 장력이 가해질 수 있도록 하였으며, 이는 전기 아크가 방전되었을 때 광섬유 직경 변화의 원인을 제공한다. 고정된 광섬유 중심에 쌍으로 구성된 전극을 설치하고 고전압 발생장치를 연결하여 제어 신호에 따라 발생된 아크가 광섬유의 코어 및 클래딩에 순간적으로 고온을 발생시켜 광섬유의 직경을 가늘게 만든다. 아크로 장주기 광섬유 격자를 제조시에 광섬유에 아크를 인가한 후 일정한 격자 주기만큼 광섬유를 이동시킨 후에 다시 아크를 인가하는 과정을 격자 개수만큼 반복한다. 그러나 한 격자에 대하여 상대적으로 강한 아크를 1회씩 인가하였을 때 장주기 격자의 손실이 매우 작거나 광섬유가 끊어지고, 광섬유 직경 변화의 조절이 매우 어려워 재현성 있게 장주기 광섬유 격자를 제조하기 어렵다.

본 논문에서는 한 격자에 대하여 약한 아크를 수 차례 발생시켜 광섬유에 약한 변형을 수 차례 주어 정밀하게 격자의 직경을 조절할 수 있는 중첩 장주기 광섬유 격자의 제작 방법을 제안하였다. 이 방법으로 장주기 격자를 안정적으로 재현성 있게 제작할 수 있었으며, 높은 손실과 낮은 삽입손실을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용된 광섬유는 단일모드 광섬유로 코어 및 클래딩의 직경이 각각 10 μm와 125 μm 이었으며, 차단 파장은 1260 nm인 Fujikura 제품을 사용하였다.

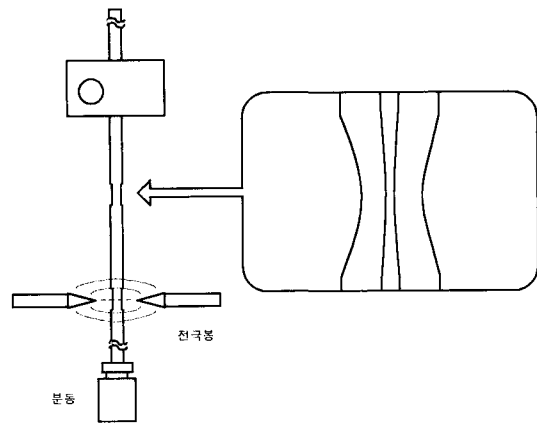


그림 2. 아크 방전을 이용한 장주기 격자 제작 시스템의 블록도

Fig. 2. Block diagram of long-period grating fabrication system using arc-discharge.

아크 방전으로 광섬유의 직경을 변화시켜 제작된 장주기 격자의 변형을 살펴보기 위하여 광섬유의 측면 및 코어 단면을 광학 현미경으로 측정하였으며, 그림 3과 같다. 아크 방전 시간에 따른 광섬유의 직경 변화를 살펴보기 위하여 마이크로프로세서에서 방전 시간을 프로그래밍으로 변화시켰으며 전극을 통해 아크를 광섬유의 측면에 인가하였다. 방전 전압은 약 1.35 kV 이며 전극 간의 간격은 약 2.8 mm 이다. 그리고 격자 주기를 600 μm로 유지시키면서 격자 32개를 생성하여 길이가 19.2 mm인 장주기 격자를 제작하였다. 그림 3 (a)는 광섬유의 변형을 가하지 않은 광섬유의 클래딩이며, 그림 3 (b)와 3 (c)는 각각 0.6과 1.0 s 동안의 아크 방전을 광섬유에 인가하였을 때 클래딩의 변형을 나타낸 것이다. 아크 방전에 의해서 광섬유 클래딩의 직경 변화가 나타나고, 방전 시간을 길게 할수록 광섬유 코어 및 클래딩 직경의 감소가 큰 것을 알 수 있다. 그림 3의 (d)와 (e)는 광섬유의 코어를 200배 확대하여 직경

변화를 측정된 결과로, 그림 3의 (d)는 아크방전을 하지 않은 광섬유의 코어이며, 그림 3의 (e)는 아크 방전을 1.0 s 만큼 인가하였을 때 광섬유의 코어 직경이다. 그림 3을 통하여 광섬유의 코어가 원형을 유지하면서 직경이 감소한 것을 살펴 볼 수 있으며, 결국 아크 방전 시간 조절에 의하여 광섬유의 코어 및 클래딩의 직경 변화를 조절할 수 있다.

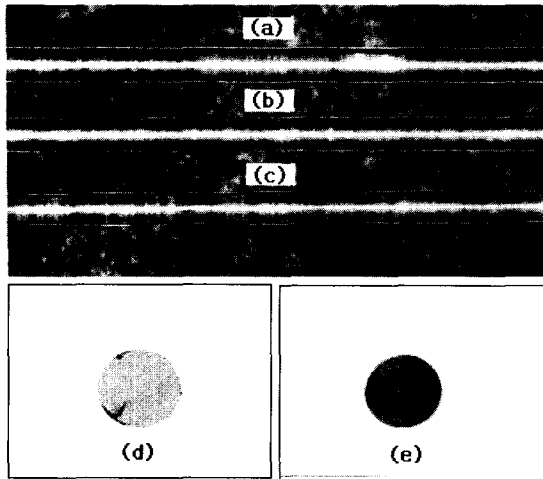


그림 3. 일반 광섬유와 아크 방전을 인가한 경우의 광섬유의 직경 비교
Fig. 3. Comparison of diameter between normal and arc discharged fiber.

광민감성 광섬유 및 자외선 레이저를 사용하여 장주기 격자를 제작하는 경우에 광섬유 코어의 굴절률 변화로 실효 굴절률의 변화가 발생하는 것과는 달리, 광민감성이 없는 일반 광섬유에 아크 방전을 주기적으로 인가한 경우 광섬유의 코어 및 클래딩의 직경 변화로 실효 굴절률의 변화가 발생하는 것을 알 수 있었다. 격자 개수 및 중첩횟수 변화에 따른 장주기 격자의 공진 파장을 측정하기 위해 광원으로는 SLD(super luminescent diode)와 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer)를 사용하여 아크로 유도된 광섬유 격자의 파장 특성을 측정하였다.^[12] 그림 4의 (a)와 (b)는 아크 발생시간을 1.0 s, 격자 주기를 600 μm로 고정하여 실험하였다. 32개의 격자에 대해 아크를 1회씩 발생하여 격자를 제작한 후에 측정된 투과 스펙트럼은 그림 4 (a)에서 1회라고 표시되어 있으며, 처음부터 다시 아크 방전과 이동을 반복하면서 2회까지 중첩한 결과를 2회로 표시했다(Type I). 코어로 진행하는 LP₀₂모

드와 동일 방향으로 진행하는 클래딩 모드인 LP₀₃, LP₀₄, LP₀₅ 모드와 결합하여 특정한 파장에서 대역 저지 필터로 작용하는 것을 알 수 있었다. LP₀₁ 모드는 LP₀₄ 모드와 결합하여 1479 nm에서 28 dB의 손실을 나타내었으며, 반치폭(full width half maximum)은 25 nm 이고, background 손실은 1 dB 이하로 나타났다. 이와 비교하여 그림 4 (b)는 격자를 16개, 아크 방전을 5회 중첩할 경우의 투과 스펙트럼 특성으로 격자의 개수가 감소하였을 때 투과 손실의 감소 및 대역폭이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그림 4(a)와 (b)에서 중첩을 반복함에 따라 공진 파장이 우측으로 이동하는 것을 볼 수 있으며 고차모드에서 더욱 많이 이동하는 것을 볼 수 있다. 이 공진 파장의 이동은 앞에서 이야기 한 것과 같이 격자 32개에 대하여 1회씩 아크를 인가하면서 격자를 제작하였을 때 격자 주기가 600 μm 이었으나 그후 2회와 3회를 반복하면서 광섬유 직경 감소와 격자 주기의 증가가 동시에 이루어지기 때문이다. 이것에 대한 자세한 설명은 뒤에서 다룬다. 따라서 중첩 아크 방전을 이용하여 생성된 코어 및 클래딩의 직경변화를 이용하여 재현성있게 코어 모드 및 클래딩 모드의 결합을 유도 할 수 있으며, 장주기 격자의 손실을 조절할 수 있었다.

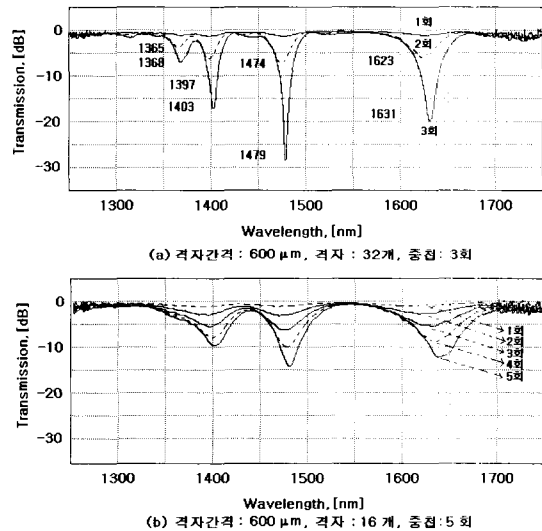


그림 4. 격자 개수 및 아크 중첩 회수에 따른 장주기 격자의 투과 스펙트럼
Fig. 4. Transmission spectra of long-period grating according to number of grating and arc superposition.

장주기 격자의 주기 변화에 따른 공진 파장 이동 특성을 확인하기 위하여, 아크 방전시간을 0.9s, 격자 수를 32개 그리고 아크 방전 횟수를 5회로 고정하고, 광섬유의 격자 주기 조절하기 위하여 마이크로프로세서의 프로그래밍을 통해 이송 장치의 이동거리를 다르게 조절하였다. 이 실험에서는 그림 4의 실험과는 달리 격자 1개에 대해 5회 아크를 인가하고 난 후에 이동하고 다음 격자에 아크를 5회 인가하는 방법을 사용하여 격자를 제작하였다(Type II). 격자 주기는 450 μm 에서 700 μm 까지 25 μm 단위로 11개의 장주기 광섬유 격자를 제작하였다. 그림 5에서는 1,200 nm에서 1,700 nm영역에서 코어 모드와 클래딩 모드의 결합에 의해서 발생된 공진 파장들을 연결하여 나타내었으며 아래에서 위쪽으로 각각 LP₀₂, LP₀₃, LP₀₄, LP₀₅, LP₀₆ 모드를 표시하고 있다. 그림 5에서 직선으로 표시한 결과는 위상정합 이론을 사용하여 시뮬레이션 결과를 표시한 것이며, ○로 표시된 결과는 실험을 통하여 얻은 결과를 나타내고 있다. 이 실험을 통하여 아크로 유도된 장주기 격자의 격자 주기와 공진 파장의 관계가 위상정합 이론에 잘 부합됨을 알 수 있었다. 코어 모드와 결합한 클래딩 모드는 단파장 영역에서는 저차의 클래딩 모드와 결합이 이루어지며, 장파장 영역에서는 고차 클래딩 모드와 결합이 이루어지는 것을 이론과 실험 결과로 알 수 있다. 제작된 장주기 격자의 경우 광섬유의 공진 파장 이동 특성을 살펴보면 격자 주기가 증가할수록 장파장대로 모든 공진 파장이 이동하는 것을 볼 수 있으며, 특

히 저차 모드의 파장 이동 보다 고차 모드의 파장 이동이 큰 것을 알 수 있다. 이는 광섬유에 존재하는 도파로 분산 (waveguide dispersion)의 영향임을 알 수 있다.^[18]

식(11)로부터 계산을 통해 얻은 광섬유의 반경 변화율 $\delta a/a$ 에 대한 공진 파장 이동 특성은 그림 6에서 실선으로 표시되었다. 이 계산에서 격자 한 주기 동안의 평균코어 반경 변화율 $\delta a/a$ 적용하였으며 격자 주기는 600 μm 로 고정하였다. 아래에서 위로 LP₀₂, LP₀₃, LP₀₄, LP₀₅ 모드와의 결합에 관련된 공진 파장 이동 특성을 나타냈다. 직경 감소에 따라 LP₀₂ 모드는 단파장으로 많이 이동은 하는 것을 알 수 있으며, 이에 비해 LP₀₅ 모드는 거의 파장의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 반경 변화율이 0.12인 경우에 0.04인 경우보다 LP₀₂ 모드의 공진 파장이 단파장 쪽으로 52.2 nm 이동하였다. 이것은 저차 모드 보다 고차 모드에서 아크에 의한 실효 굴절률 변화의 차가 작고, 실효 굴절률 차가 크기 때문에, 즉 공진 파장 변화 식(11)에서 고차 모드에서 분자가 작고 분모가 크기 때문에 공진 파장 변화가 작다. 그리고 파장 감소나 증가의 부호는 앞에서 언급한 것과 같이 γ 의 부호에 의해 결정되며 고차 모드 (LP_{0,1+m}, $m \geq 8$)에서 음이 되기 때문에 고차 모드에서 직경 감소에 따른 파장 증가가 예상된다.

또한 그림 6의 X로 표시된 것은 위상 매칭 조건으로부터 직접 구한 결과이다. 식 (11)로 부터 구한 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 아크 방전을 이용한 장주기 광섬유 격자의 코어 및 클래딩의 반경 변화에 의해 나타나는 파장 이동 특성을 측정하기 위해 장주기 격자의 주기는 600 μm , 격자 개수는 32개 그리고 중첩 횟수는 5회로 고정하고 아크 방전 시간은 0.6 ~ 1.0 s로 0.1 s씩 증가하여 5개의 장주기 광섬유 격자를 제작하여 파장을 측정하였다. 이 실험에서도 Type II의 실험 방법을 적용하여 격자 주기를 고정하였다. 아크 방전 시간 조절은 마이크로프로세서에서 고전압 발생 장치의 단속 시간 조절로 가능하다. 아크 방전 시간에 대한 평균 직경 변화율을 측정하기 위하여 격자가 새겨진 광섬유와 격자가 새겨지지 않은 광섬유를 나란히 놓고 현미경 사진을 촬영하였으며, 각각 그림 3의 (b)와 (c) 그리고 그림 3의 (a)와 같다. 이 사진을 확대하여 평균 광섬유 직경 변화율을 결정하였다. 이 실험 결과가 그림 6에서는 ○로 표시하였으며, 위에서 언급한

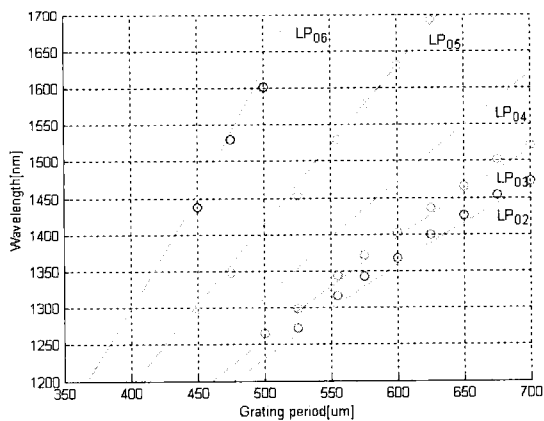


그림 5. 격자 주기에 따른 장주기 격자의 공진 파장 (실선은 수치해석, ○는 실험 결과)
Fig. 5. Resonance wavelength of long-period grating according to period of grating.

두 계산 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다. 그리고 중첩횟수를 6회 이상으로 증가 시켜서 직경 변화를 더욱 더 증가시킬 때에 파장 감소 현상은 계속되지만 격자의 손실이 더 증가하다가 약 30 dB 이상이(코어 모드와 LP04 클래딩 모드와의 결합)되면 과다결합 현상이 발생되어 손실이 다시 감소하게 된다.

그림 4에서의 Type I의 아크 중첩의 횟수의 증가로 인한 파장 증가에 대해 설명하면, 이 경우에는 격자 주기가 증가하고 동시에 광섬유 직경이 감소한다. 다시 말하면 그림 5와 6의 현상이 동시에 발생된다. 코어의 평균 반경 감소율이 2%가 발생할 때 격자 주기는 24 μm 정도 증가한다. 그림 5에서 24 μm 격자 주기에 따른 공진 파장 변화는 $LP_{05} = +52.2 \text{ nm}$, $LP_{02} = +27.7 \text{ nm}$ 정도이고, 그림 6과 식(11)에서 코어 직경 2% 감소에 의한 파장 변화는 $LP_{05} = -6.3 \text{ nm}$ 이고 $LP_{02} = -13.9 \text{ nm}$ 가 된다. 단지 이 두 현상을 합한다면 $LP_{05} = +45.9 \text{ nm}$ 와 $LP_{02} = +13.8 \text{ nm}$ 가 된다. 따라서 Type I의 장주기 격자에 대해 중첩으로 인한 공진 파장을 장파장으로 이동시키는 격자주기의 증가현상과 단파장으로 이동시키는 직경의 감소가 발생되지만 장파장으로 이동 현상이 우세하다. 또한 중첩횟수에 따라 공진 파장에서의 손실이 증가는 중첩으로 인한 결합계수의 증가에 기인한다.

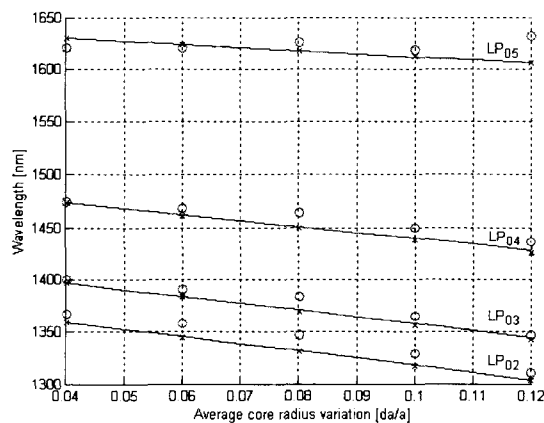


그림 6. 광섬유 코어 반경 변화율에 따른 장주기 격자의 공진 파장(실선 : 식(11), × : 위상정합조건, ○ : 실험결과)

Fig. 6. Resonant wavelength vs. core radius variation.

아크방전을 이용하여 제작된 장주기 광섬유 격자의 주위 온도 변화에 따른 최대 손실을 나타내는 공진 파

장의 이동 특성을 측정하였다. 본 연구에서 사용된 광섬유는 코어의 굴절률을 높이기 위하여 게르마늄을 첨가한 것으로 온도에 따라 장파장 대역으로 이동하는 특징을 나타낸다.^[30] 온도에 따라 중심 파장의 이동을 측정하기 위해 항온조에 아크 방전을 이용하여 제작된 장주기 광섬유 격자를 넣고 15 ~ 80 (°C)의 온도 범위에서 측정하였다. 또한 아크 방전에 의해 제작된 장주기 격자가 아크 방전 시간에 따라 중심파장의 이동이 다르게 나타나는지에 대해 확인하기 위해 아크 방전 시간이 각각 0.6 와 1.0 s인 장주기 광섬유 격자의 이동 특성을 살펴보았다. 그림 7은 코어 모드와 LP05인 클래딩 모드가 결합되는 중심 파장의 이동 기울기가 아크 방전 시간이 0.6 s인 경우 0.055 nm/°C, 아크 방전 시간이 1.0 s인 경우 0.054 nm/°C 임을 나타내고 있다. 이 결과로부터 약하게 새겨진 격자에 대해서 아크 방전 시간이 온도 변화에 따라 장주기 격자의 중심 파장 이동에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

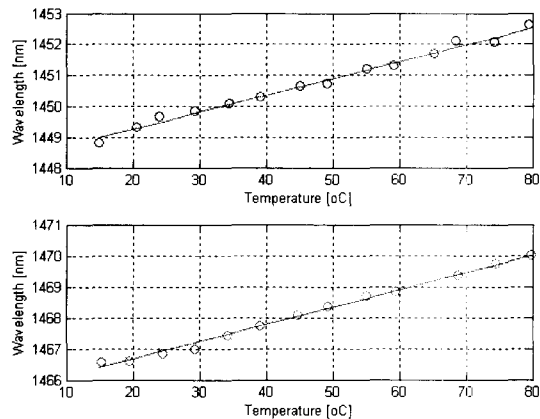


그림 7. 온도 변화에 따른 장주기 격자의 공진 파장.
Fig. 7. Resonant wavelength according to change of temperature.

아크 방전 시간이 각각 0.6 s와 1.0 s로 제작된 장주기 격자와 일반 광섬유의 인장에 의한 파괴점(break point)을 관찰하여 Weibull 곡선으로 표현하였다.^[21] 아크 방전을 이용한 장주기 격자 제작시 광섬유의 자켓을 반드시 제거해야 하는데 이때 기계적인 방법으로 제거할 경우에 광섬유의 표면에 상처를 주게되면 직경의 변형에 의한 파괴점을 정확하게 찾을 수 없으므로 화학적인 방법인 메틸렌 클로라이드(CH_2Cl_2)를 이용하여 제거하였다. 그림 8은 일반 광섬유와 아크 방전을

이용하여 제작된 장주기 격자의 인장강도를 비교한 결과로, 일반 광섬유의 경우 평균 파괴점은 0.36 GPa로 측정되었으며, 아크 방전으로 제작된 장주기 격자의 파괴점은 이 보다 작은 0.35 GPa로 측정이 되어 아크방전에 의하여 광섬유가 열화 및 직경감소로 인한 인장강도 변화가 Eximer 레이저를 조사함에 의해 발생하는 인장감도의 감소보다 그렇게 크지 않은 것으로 측정되었다.

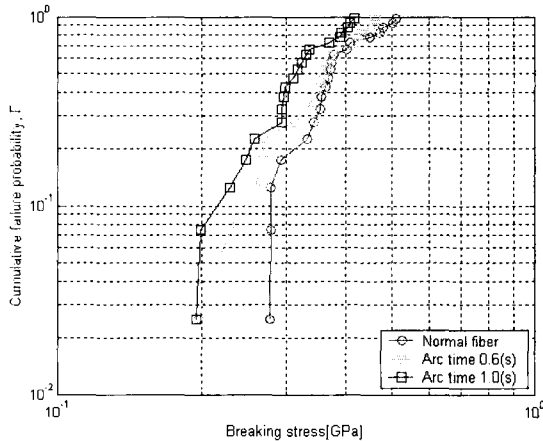


그림 8. 장주기 격자의 기계적 강도
Fig. 8. Mechanical strength of long-period grating.

IV. 결 론

본 연구에서 장주기 격자의 제작 방법으로 아크 방전을 이용한 직경 변화를 사용하였다. 특히 아크 방전을 이용하여 장주기 격자 제작할 때 재현성있게 격자를 제작할 수 있도록 비교적 약한 아크를 수 차례 반복하여 인가하는 아크 유도 중첩(arc-induced superposition) 장주기 격자를 제안하였고, 이 방법으로 제작된 장주기 광섬유 격자의 파장 이동 특성을 측정하였다. 또한 본 논문에서는 위상 매칭 방법으로 직경 변화에 의한 공진 파장의 변화를 이론적으로 유도하고 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 실험 결과를 비교하여 일치함을 확인하였다. 아크 방전으로 제작된 장주기 광섬유 격자는 광섬유의 코어 및 클래딩의 직경의 감소에 따라 실효 굴절률의 변화가 발생하게 되며 LP₀₂ 모드는 단파장으로 많이 이동은 하는 것을 알 수 있었으며, 이에 비해 LP₀₅ 모드는 거의 파장의 변화가 없는 것을 볼 수 있었다. 아크 유도 장주기 광섬유 격자에서 격자 주기와 공진 파장과의 관계가 위상정합 조건에

잘 부합하는 것을 확인하였고, 온도의 증가에 따라 공진 파장의 이동이 장파장 영역으로 이동하고, 아크 방전으로 제작된 장주기 광섬유 격자는 약하게 새겨진 장주기 격자의 경우 광섬유의 직경의 변화에 따라 거의 동일한 온도 계수 및 파괴 강도를 갖는 것으로 측정되었다. 고온에서도 격자가 지워지지 않는 특징을 가지고 있기 때문에 고온 센서로 사용하기에 적합한 아크 유도 중첩 장주기 격자는 광통신과 광센서의 응용에도 많이 사용되리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, et. al., "Long-period fiber-grating-based gain equalizers," *Opt. Lett.*, Vol. 21, No. 5, pp. 336~338, 1996.
- [2] H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey, J. R. Pedrazzani, A. M. Vengsarkar, "Hybrid Fiber Bragg Gating/Long Period Fiber Grating Sensor for Strain/Temperature Discrimination," *Photon Technol. Lett.*, Vol. 8, No. 9, pp. 1223~1225, 1996.
- [3] R. W. Fallon, L. Zhang, L. A. Everall, J. A. R. Williams, I. Bennion, "All-fiber optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long-period grating," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 9, No. 12, pp. 1969~1973, 1998.
- [4] V. Bhatia, A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.*, Vol. 21, No. 9, pp. 692~694, 1996.
- [5] B. Ortega, L. Dongm W. F. Liu, J. P. Desandro, L. Reekie, et. al., "High-performance optical fiber polarizers based on long-period gratings in birefringent optical fibers," *Photon. Technol. Lett.*, Vol. 9, No. 10, pp. 1370~1312, 1997.
- [6] A. M. Vengsakar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, J. E. Sipe, "Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters," *J. of Lightwave Technol.*, Vol. 14, No. 1, pp. 58~65, 1996.
- [7] I. K. Hwang, S. H. Yun, B. Y. Kim, "Long-period fiber gratings based on periodic

- microbends," *Opt. Lett.*, Vol. 24, No. 18, pp. 1263~1265, 1999.
- [8] C. Narayanan, H. M. Presby, and A. M. Vengsarkar, "Band-rejection fiber filter using periodic core deformation," *Electron. Lett.*, Vol. 33, No. 4, pp. 280~281, 1997.
- [9] M. Akiyama, K. Nishide, K. Shima, A. Wada, R. Yamauchi, "A novel long-period fiber grating using periodically released residual stress of pure-silica core fiber," *OFC '98 Technical Digest*, paper ThG1, pp. 276~277.
- [10] D.D. Davis, T.K. Gaylord, E. N. Glytsis, S. G. Kosshinski, S. C. Mettler and A. M. Vengsarkar, "Long-period fiber grating fabrication with focused CO₂ laser pulses," *Electron. Lett.*, Vol. 34, No. 3, pp. 302~303, 1998.
- [11] C. Chung, H. Lee, "Wavelength Characteristics of Arc-Induced Long-Period Grating by Core and Cladding Diameter Modulation", in *Proc. of IEEE/LEOS LEOS 2001 Annual Meeting*, ThO 2, pp. 778~779.
- [12] S. G. Kosinski and A. M. Vengsarkar, "Splice-based long-period fiber gratings," in *OFC'98 Tech. Dig.*, paper ThG3, pp. 278~279.
- [13] N. Godbout, X. Daxhelet, A. maurier, and S. Lacroix, "Long-period fiber grating by electrical discharge," in *Proc. ECOC'98*, pp. 397~398.
- [14] Rego G, Okhotnikov, Dianov E and Sulimov V. "Long-period fiber gratings stable at very high temperatures," in *proceedings of Bragg Gratings, Photosensitivity and poling in Glass Waveguides*, (4-6 July 2001, Stresa, Italy), BFB4-1.
- [15] G. Rego, O. Okhotnikov, E. Dianov and V. Sulimov, "High-Temperature Stability of long-period fiber gratings produced using an electric arc," *J. of Lightwave Technol.*, Vol. 19, No. 10, pp. 1574~1579, 2001.
- [16] Turan Erdogan, "Fiber Grating Spectra", *J. of Lightwave Technol.*, Vol. 15, No. 8, pp. 1277~1294, 1997.
- [17] K. Okamoto, *Fundamentals of optical waveguides*, (Academic Press, 2000).
- [18] T. W. MacDougall, S. Pilevar, C. W. Haggans, M. A. Jackson, "Generalized Expression for the Growth of Long Period Gratings," *Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, No. 10, pp. 1449~1451, 1998.
- [19] Y. G. Han, C. S. Kim, K. Oh, U. C. Paek, Y. Chung, "Performance enhancement of strain and temperature sensors using long period fiber grating," *OFS*, Tu2-7, 1999.
- [20] J. N. Jang, S. Y. Kim, S. W. Kim, M. S. Kim, "Novel temperature insensitive long-period grating by using the refractive index of the outer cladding," *OFC 2000*, Technical digest, TuB4, 2000.
- [21] Hans G. Limberger, Dimitris Varelas, "Advances in Fiber Gratings: Technology, Applications, and Reliability," *SPIE Optical Engineering Press*, 1999.

저 자 소 개



鄭 澈(正會員)

1974년 1월 4일생. 1996년 호서대학교 정보통신공학부 졸업(공학사), 1998년 호서대학교 정보통신공학과 졸업(공학석사), 1999년~현재 : 호서대학교 정보통신공학과 박사과정, 2002년~현재 : (주) 아이세스 재직.

<주관심분야 : 광섬유 센서 시스템, 장주기 격자 소자, 광통신>

李 鎬 俊(正會員) 第38卷 SD編 第3號 參照