

어븀 첨가 광섬유의 첨가 농도에 따른 광유도 굴절률 및 분산의 변화

강승철 · 임기수
충북대학교 물리학과

이학규 · 임동성 · 김경현
한국전자통신연구원 원천기술연구부

(1998년 10월 14일 받음, 1999년 1월 7일 수정본 받음)

두 개의 짧은 광경로가 밀착된 마하젠더 간섭계를 사용한 보다 간단하고 효율적인 실험방법을 통하여 펄프광에 의해 유도되는 어븀 첨가 광섬유의 굴절률 변화와 분산특성을 측정하였으며, 어븀 첨가 농도와 펄프광 세기에 따른 이들 값들의 변화특성을 규명하였다. 어븀 이온의 첨가 농도가 300 ppm에서 700 ppm으로 증가할 때 1510~1560 nm의 파장 범위에서 1530 nm의 공명파장 전후로 광유도된 굴절률과 분산의 변화량은 거의 선형적으로 증가하며 펄프광의 세기가 커질수록 변화량들은 증가하다가 전자들이 전부 여기됨과 동시에 점차 포화되는 것을 알 수 있었다.

I. 서 론

어븀 첨가 광섬유(EDF)는 전송손실이 가장 작은 광통신 대역인 1.55 μm 파장 근처의 넓은 파장영역에서 광증폭 특성을 가지고 있기 때문에,^[1] 이를 다양한 용도의 광증폭기로 응용하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔으며,^[2] 분산에 의한 펄스 폭 증가와 비선형 효과에 의한 펄스 폭 감소가 균형을 이루어 펄스 폭이 변하지 않는 솔리톤 통신에도 응용되고 있다.^[3] 이렇게 다양한 응용성을 가지는 어븀 첨가 광섬유는 유리구조 내에 존재하는 어븀이온에 의해 나타나는 공명 유도된 광비선형성과 분산특성으로 인해 어븀 첨가 광섬유 증폭기나 극초단펄스 생성용 광섬유 레이저와 같은 응용 소자의 동작 특성에 영향을 미친다. 이러한 소자들과 시스템의 동작 특성을 최적화 하기 위해서는 어븀 첨가 광섬유의 도핑농도와 펄프 파워 그리고 광섬유의 기하학적 구조와 같은 변수에 의해 공명 유도되는 비선형성과 분산특성이 어떻게 의존하는가를 이해하는 것이 중요하다. Kramers-Kronig relation^[4]에 따르면 어븀 첨가 광섬유에 광펄프를 할 경우와 하지 않을 경우 신호광 파장에서 흡수계수의 변화가 신호광 파장에서 굴절률의 변화를 유도한다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 굴절률 변화는 광섬유의 분산특성에 영향을 미치므로 솔리톤 시스템과 회로 이온 첨가 광섬유 소자의 동작 상태를 결정하는데에 있어 중요한 요소이다. 보고된 기존 연구들에서는 측정을 위한 실험 구성이 복잡하고 위상변조(phase modulation)나 차등 검출법(differential detection), 되먹임 회로(electronic feedback) 등 기 기술들이 사용되었다.^[5,6] 본 실험에서는 두 개의 짧은 광경로가 밀착된 마하젠더(Mach Zehnder) 간섭계 구조로 기존에 보고된 실험구성보다 간단하면서도 효과적인 방법을 사용하였으며, 이를 통해 광유도된 굴절률 변화와 그에 따른 분산변

화특성을 어븀이온 첨가농도와 펄프파워에 대해 측정하였다. 이와 같은 방법으로는 처음으로 다양한 첨가농도를 갖는 어븀 첨가 광섬유의 광유도된 굴절률 변화와 그에 따른 분산특성을 어븀이온 첨가농도와 펄프파워에 대해 측정하였다.

II. 이 론

2.1. 어븀 첨가 광섬유의 광유도 굴절률 변화의 이론적 모델

Ladenburg-Fuchtbauer 관계식^[7]을 사용하여 흡수와 형광스펙트럼으로부터 흡수 단면적(σ_a)과 방출 단면적(σ_e)을 파장의 함수로 얻을 수 있다. 포화되지 않은 영역에서 ${}^4I_{15/2}$ 와 ${}^4I_{13/2}$ 준위 사이의 전이에 의해 나타나는 어븀 원자의 복소감수율중 허수부분은 Desurvire^[2]에 의해 다음과 같이 유도되었다.

$$\chi''(\lambda, z) = -n \frac{\lambda}{2\pi} [N_2(z)\sigma_e(\lambda) - N_1(z)\sigma_a(\lambda)] \quad (1)$$

n 은 굴절률이고, $N_1(z)$ 와 $N_2(z)$ 는 위치 z 에서 ${}^4I_{15/2}$ 와 ${}^4I_{13/2}$ 에너지 준위의 평균밀도를 나타낸다. 식(1)과 Kramers-Kronig 관계식을 이용하면 펄프광에 의해 유도되는 굴절률 변화 Δn 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta n(\lambda) = \frac{\Gamma_s}{2nL} \int_0^L [\chi_p'(\lambda, z') - \chi_0'(\lambda, z')] dz' \quad (2)$$

L 은 광섬유의 길이이고, Γ_s 는 신호광의 모드중첩(Mode integral)을 나타내는 값이다.

χ_p' 과 χ_0' 은 각각 펄프광이 있는 경우와 없는 경우 복소 원자 감수율의 실수 부분이다. 위치 z' 에 대해서, χ_p' 과 χ_0' 은 식(1)에서 주어진 감수율의 허수부분을 Kramers-Kronig transform^[4]하여 얻을 수 있다. $\chi_i'(i=P, 0)$ 의 해석적 표현식은

2준위 레이저 시스템과 광전이가 로렌츠 선모양(Lorentzian lineshape)^[8]을 갖는다는 가정을 통해 얻을 수 있다.

$$\chi_i'(\lambda, z) = -[N_1(z) - N_2(z)] \frac{\lambda^3}{16\pi^2 n \tau_2} g_{12}(v - v_0) \quad (3)$$

이 식에서 v 는 광 진동수이고, v_0 는 공명 진동수이다. τ_2 는 준안정에너지 준위의 수명(lifetime)이고, $g_{12}(v - v_0)$ 는 선모양 함수이다.

$$g_{12}(v - v_0) = \frac{1}{\pi} \frac{(v - v_0)}{\left(\frac{\Gamma_{12}}{2}\right)^2 + (v - v_0)^2} \quad (4)$$

Γ_{12} 는 에너지 준위간의 전자 천이에 해당하는 흡수 스펙트럼의 FWHM(Full Width at Half Maximum)을 나타낸다. 펌프 파워가 흡수계수 α_p 를 가지는 광섬유를 따라 지수적으로 감소한다고 가정하면,

$$P_{pump}(z) = P_{pump} \exp(-\alpha_p z) \quad (5)$$

로 나타내어진다. 식(3)을 식(2)에 대입하여 적분하면 다음 식을 유도할 수 있다.^[6]

$$\Delta n(\lambda) = \frac{N \Gamma_s \lambda^3}{16\pi^2 n_2 \tau_2 \alpha_p L} g_{12}(v - v_0) \cdot \left(\alpha_p L - \log \frac{P_{pump} + P_{th} e^{\alpha L}}{P_{pump} + P_{th}} \right) \quad (6)$$

한편, 분산은 매질내의 파장에 따른 굴절률의 변화를 나타내며, 펌프 광에 의해 유도되는 분산값은 다음과 같이 정의된다.

$$D_R(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \Delta n}{d\lambda^2} \quad (7)$$

여기에서 Δn 은 펌프 광에 의해 유도된 굴절률의 변화이고, c 는 진공 중에서 빛의 속도이며 λ 는 신호광의 파장이다.

2.2. 펌프광에 의해 유도된 위상변화 측정을 위한 간섭계 방법

마하젠더 간섭계의 출력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P = P_0 + P_1(1 + \cos\Delta\phi) \quad (8)$$

P_0 는 ASE로 구성된 offset power와 다른 편광상태나 비간섭적인 요소에 의해 간섭과정에 참여하지 않은 신호광을 나타내며, P_1 은 간섭무늬의 진폭을 나타낸다. 한편 L_s 는 단일모드 실리카 광섬유의 길이, L_{Er} 은 어븀 첨가 광섬유의 길이를 나타내고, 간섭계의 한 팔 내에 있는 단일모드 실리카 광섬유의 길이가 ΔL_s 만큼 길다면 두 팔 사이의 위상차는

$$\Delta\phi_{unpump(1-2)} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_s \Delta L_s \quad (9)$$

로 쓸 수 있다.

만일 길이가 ΔL_s 만큼 긴 팔에만 광펌핑을 하여 어븀 첨가 광섬유의 굴절률 변화량 Δn_{Er} 이 생긴다면, 두 팔 사이의 위상차는

$$\Delta\phi_{pump(1-2)} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_s \Delta L_s + \Delta n_{Er} L_{Er}) \quad (10)$$

이다. 그러므로 광펌핑을 한 경우와 하지 않은 경우의 위상차이는

$$\Delta\phi_{pump(1-2)} - \Delta\phi_{unpump(1-2)} = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_{Er} L_{Er}) \quad (11)$$

이다.

한편 위상 항은 (8)식을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_i = \arccos\left(\frac{P_{(i)} - P_{0(i)}}{P_{1(i)}} - 1\right) \quad (12)$$

$(i = pump, unpump)$

식(8)에서 알 수 있듯이 간섭신호의 출력 값은 위상항 $\cos\Delta\phi$ 에 의해 봉우리와 골에서 각각 최대값인 $[P_{0(i)} + 2P_{1(i)}]$ 과 최소값 $[P_{0(i)}]$ ($i = pump, unpump$)를 가짐을 알 수 있다. 광펌핑을 한 경우와 하지 않은 경우의 굴절률 변화에 의한 위상 변화량을 구하기 위해, 이 두 가지 경우에 있어서 측정된 간섭계 출력의 변화량을 식(12)을 파장에 따른 실제 위상값으로 계산한 후, 펌핑한 경우의 위상 변화량에서 펌핑하지 않은 위상 변화량을 빼준다. 이렇게 하면 펌프에 의해 유도된 굴절률의 변화에 의한 위상 변화의 요소만이 남게된다.

III. 펌프광에 의해 유도된 위상변화측정

어븀 첨가 광섬유의 펌프광에 의해 유도된 위상 변화를 측정하기 위해 그림 1과 같은 시스템을 구성하였다. 펌프광원으로 레이저 파장이 980 nm인 Seastar Optic의 레이저 다이오드를 사용하였으며, 신호광은 HEWLETT PACKARD 8168F 파장 가변형 반도체 레이저를 사용하였고, 사용 파장 범위는 1510 nm에서 1560 nm 까지였다. 간섭계의 신호광 입력단에는 신호광에 의한 어븀 첨가 광섬유내 전자 분포에 영향을 작게 하기 위해 비교적 작은 파워인 ~40 μ W의 파워가 입사하

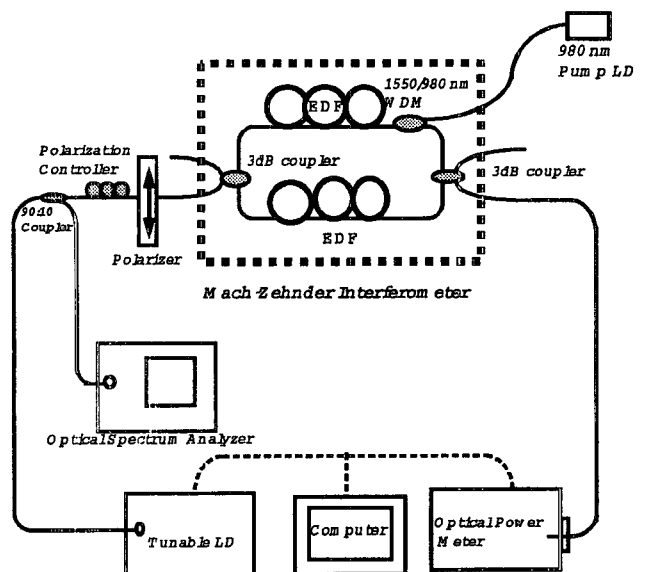


그림 1. 어븀 첨가 광섬유의 광유도 위상 변화 측정 시스템.

표 1. 실험에 사용된 어븀 첨가 광섬유의 파라미터

Parameter	Fiber A	Fiber B	Fiber C
Refractive index difference	0.02	0.022	0.03
Core radius	~2 μm	~1.5 μm	~1.5 μm
Numerical aperture	0.25	0.25	0.26
Cutoff Wavelength	1200 nm	840 nm	950 nm
Mode Field Diameter	4.8 μm	4.55 μm	4.37 μm
Erbium Concentration	300 ppm	450 ppm	700 ppm
Peak absorption@980nm	1.61 dB/m	7.89 dB/m	19.8 dB/m
Peak absorption@1530nm	2.5 dB/m	11.5 dB/m	30 dB/m
Host matrix	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ /GeO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ /GeO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ /GeO ₂

도록 조절하였으며, 사용한 신호파장 1510 nm에서 1560 nm 까지 거의 일정한 파워 수준을 유지하였다. 마하젠더 간섭계는 50:50 광섬유 결합기와 1550/980 nm WDM(Wavelength Division Multiplexing) 광섬유 커플러, 어븀 첨가 광섬유로 구성되었다. 간섭계 입력단 앞부분은 신호파장의 파장을 모니터링하기 위해 E-TEK 1550 nm 90:10 광섬유 결합기를 사용하였고, 입사하는 신호광의 편광을 일정하게 하기 위해 광섬유 편광기를 사용하였으며, 편광기의 편광과 신호광과의 편광을 일치시켜 최대출력의 신호광을 얻기 위해 편광조절기를 사용하였다. 간섭계의 각 팔에 같은 조건을 주고 한쪽 팔에만 펌프광을 입사시켜 그에 의해 유도된 차이를 알아보기 위해서 간섭계의 각 팔에 같은 길이의 어븀 첨가 광섬유를 결합시켰다. 간섭계의 출력단에서는 간섭계를 통과한 신호광의 파워를 측정하기 위해 저메니움(Ge) 검출기로 된 Newport 818-IR 파워미터를 사용하였다. 신호광으로 사용하는 파장가변레이저의 파장 변환과 출력단의 신호광 파워를 검출하기 위한 파워미터 검출값의 수집은 컴퓨터로 자동 조작이 가능하도록 하였다. 사용된 어븀 첨가 광섬유들은 INFOS사 제품의 300 ppm, 450 ppm, 700 ppm의 3가지 다른 농도를 가진 광섬유들이었으며, 구체적인 광섬유 특성은 표 1에 나타나 있다. 300 ppm 어븀 첨가 광섬유의 경우에는 사용한 광섬유의 길이는 0.6 m이고 간섭계 한 팔의 평균 길이는 3.3 m, 두 팔 사이의 길이 차이는 1.1 mm이었다. 450 ppm과 700 ppm의 어븀 첨가 광섬유들에 대해서는 사용된 길이가 각각 0.75 m와 0.3 m이었으며, 간섭계 한팔의 길이는 4.55 m와 3 m이었고, 간섭계 두 팔 사이의 길이 차이는 각각 1 mm와 1.2 mm가 되도록 구성되었다. 마하젠더 간섭계 구성에 있어서는 음향 진동(Acoustic perturbation)과 열팽창/수축(Thermal drift)와 같은 외부 환경의 변화에 대해 오차가 생기는 것을 줄이기 위해 간섭계의 각 팔은 서로 붙어 있도록 구성하여 두팔이 환경 변화에 따라 같은 변화를 경험하도록 하였으며, 간섭계 전체를 상자안에 넣어 간섭계의 불안정 정도를 최소화하도록 하였다. 간섭계의 출력은 각각의 파장이 변화할 때 외부환경의 변화에 의한 오차를 줄이기 위해 각 파장에 대해 측정된 출력값 10개를 평균하여 기록하였다.

IV. 결과 및 논의

4.1. 펌프광에 의해 유도되는 위상과 굴절률의 변화

그림 1에 보여지는 간섭계 구도와 측정 장치를 이용하여 간

섭계의 간섭신호 출력을 측정하였다. 그림 2는 450 ppm 어븀 첨가 광섬유를 사용하여 구성한 간섭계의 간섭신호를 한 예로 제시하였다. 펌프광의 파워가 커질수록 어븀 첨가 광섬유의 형광으로 인해 전체적인 간섭신호의 스펙트럼 분포가 어븀 첨가 광섬유의 형광 스펙트럼 모양을 가짐을 볼 수 있다. 위상과 파장과의 관계에서 알 수 있듯이 간섭계 두 팔 사이의 길이 차이가 작을수록 위상이 2π 차이가 나는 파장의 간격이 넓어지며 신호광 파장을 0.1 nm 간격으로 하여 실험하였으므로 간섭계 두 팔의 길이 차이를 1 mm 정도의 크기로 조절하는 것이 중요하다. 길이 차이가 클 경우 한 주기 내에 있는 데이터 점의 수가 줄어 정확한 간섭신호를 얻기 어려우며, 이

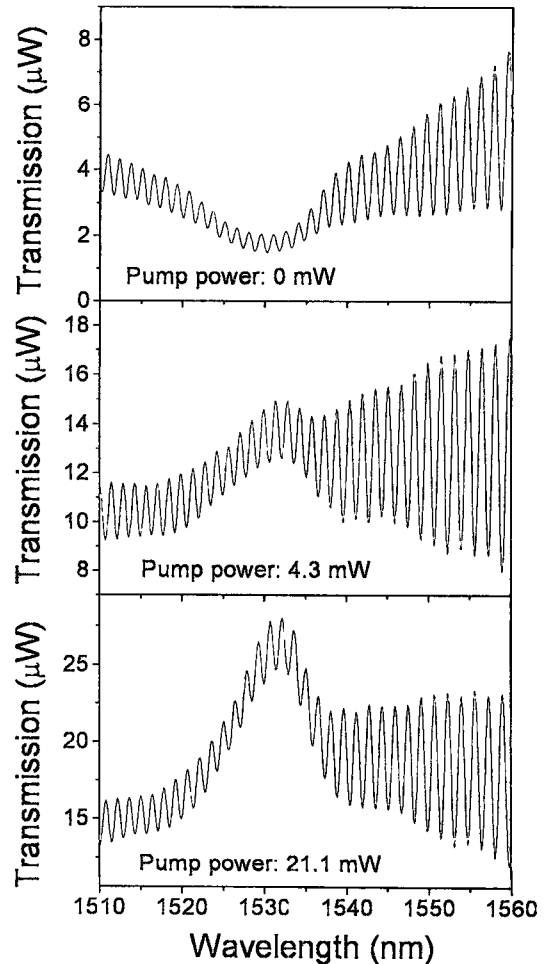


그림 2. 펌프광 세기에 따른 간섭계의 간섭신호.

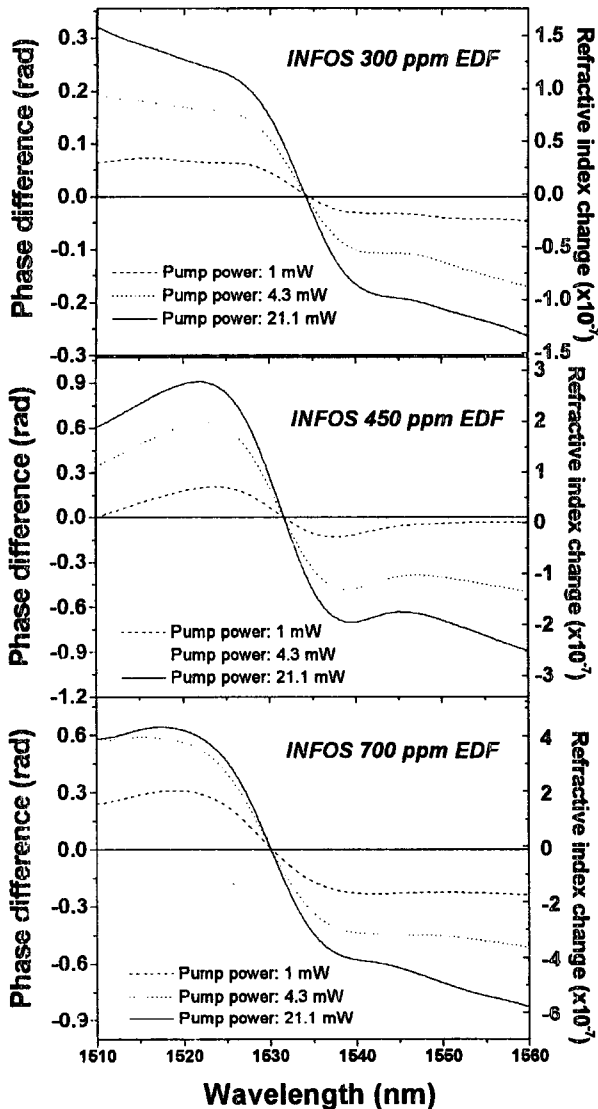


그림 3. 펌프광 세기와 파장에 따른 광유도 위상 변화와 굴절률 변화.

때문에 간섭신호를 통한 위상 변화량의 분해능이 크게 떨어진다.

그림 3은 각각 300 ppm, 450 ppm, 700 ppm 어븀 첨가 광섬유로 구성된 간섭계의 간섭 신호로부터 광펄핑을 하였을 경우와 하지 않았을 경우의 위상 변화와 굴절률 변화를 펌프광 세기와 파장에 따라 측정된 결과를 비교하여 보여주고 있다. 펌프광의 파워가 증가할수록 위상변화와 굴절률 변화가 비선형적으로 커지며 점차 포화된다. 그림 6에 제시하였듯이 어븀 첨가 광섬유의 어븀 이온 첨가율이 클수록 광유도된 굴절률 변화가 증가하는 것을 알 수 있다. 펌프 광에 의해 유도되는 굴절률의 변화를 나타내는 식(6)를 이용하여 모의 계산을 통해 얻은 이론적 계산값과 측정된 실험값을 비교하여 보았다. 계산에서 사용된 각 천이의 반치폭(FWHM), 각 천이의 크기 비율 등은 표 2^[2]에 제시하였다. 실험을 통해 측정된 펌프광 파장 980 nm의 흡수계수와 문턱 펌프값, 표 2의 파라미터들을 이용하여 펌프광 세기에 따른 굴절률의 변화를 계산

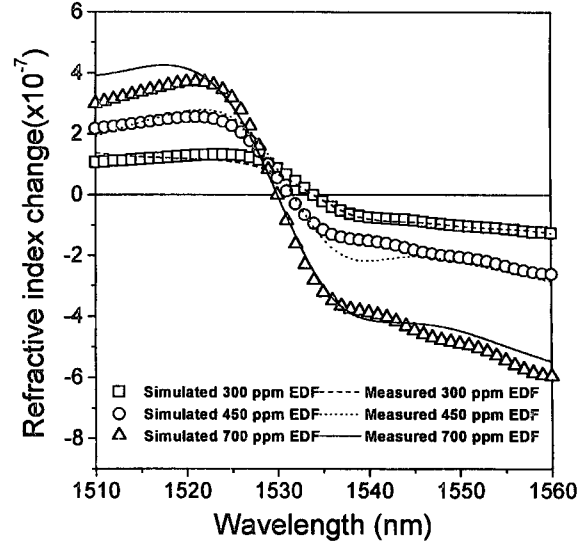


그림 4. 펌프광의 세기가 17.8 mW인 경우 광유도 굴절률 변화의 실험치와 이론치의 비교. (line: 실험값, symbol: 이론값).

표 2. 이론값 계산에 사용된 로렌츠 선모양의 파라미터 (host : SiO₂/Al₂O₃/GeO₂)^[2]

Absorption		
Amplitude	Center wavelength λ_0 (nm)	Linewidth $\Delta\lambda_0$ (nm)
0.22	1,515	35.5
0.72	1,530	18
0.17	1,544	16
0.21	1,555	18.5

하였다. 그림 4는 펌프광 세기 17.8 mW인 경우에 300 ppm, 450 ppm, 700 ppm 어븀 첨가 광섬유 각각의 굴절률 변화의 실험치와 이론치를 비교하여 보여주고 있다. 300 ppm 어븀 첨가 광섬유의 경우 각 변수의 값은 $\Gamma_s=0.17$, $N=6.6 \times 10^{24}/m^3$, $P_{th}=0.79$ mW, $\alpha_p L=0.222$ 이었고, 450 ppm 어븀 첨가 광섬유의 경우 각 변수의 값은 $\Gamma_s=0.23$, $N=9.9 \times 10^{24}/m^3$, $P_{th}=0.81$ mW, $\alpha_p L=1.365$ 이었고, 700 ppm 어븀 첨가 광섬유의 경우에는 $\Gamma_s=0.28$, $N=15.4 \times 10^{24}/m^3$, $P_{th}=0.93$ mW, $\alpha_p L=1.368$ 의 값을 대입하여 계산하였다. 흡수 계수와 문턱 펌프 세기 등은 실험을 통하여 측정하였다. 펌프광에 의해 유도된 굴절률 변화의 경향은 실험 결과와 거의 일치하나, 파장에 대한 굴절률 변화 값이 차이가 나는 것은 실제 실험에 사용한 광섬유의 선모양 함수와 계산에 대입한 로렌츠 선모양과의 불일치에 기인하는 것으로 생각된다. 즉 각 천이의 피크 (peak) 파장, 반치폭(FWHM), 크기(Amplitude) 비율 등의 차이에 의한 영향이 큰 것으로 생각된다.

4.2. 펌프광에 의해 유도되는 분산특성

굴절률의 변화량을 알면 식(7)을 이용하여 분산 특성을 계산할 수 있다. 파장에 대한 함수들을 $f(\lambda)$ 라하면 굴절률 변화식(6)을 식(7)에 대입하여 보면 펌프광에 의해 유도되는 분산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

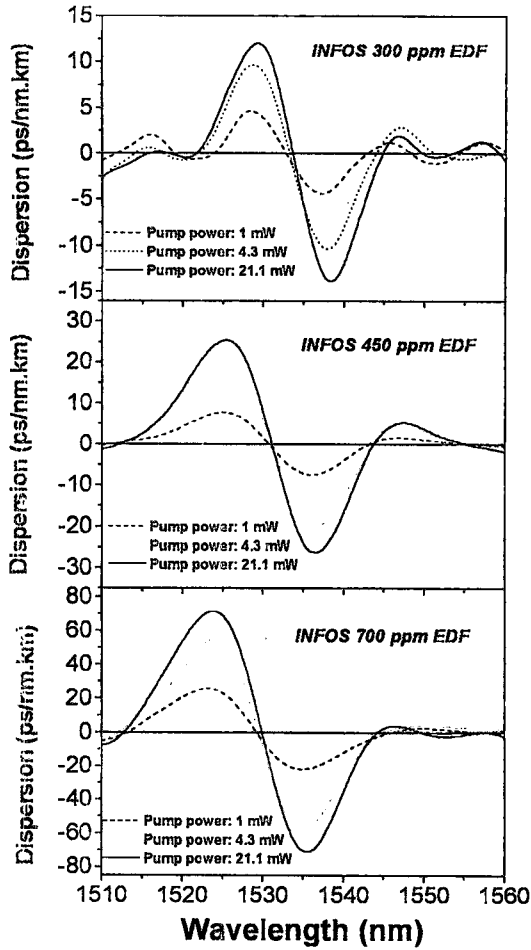


그림 5. 펌프광 세기와 파장에 따른 광유도 분산의 변화.

$$D_R(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{N\Gamma_s}{16\pi^2 n^2 \tau_2 \alpha_p L} \cdot (\alpha_p L - \log \frac{P_{pump} + P_{th} e^{\alpha_p L}}{P_{pump} + P_{th}}) \cdot \frac{d^2 f(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (13)$$

윗식(13)에서 알 수 있듯이 분산값은 파장의 함수인 로렌츠

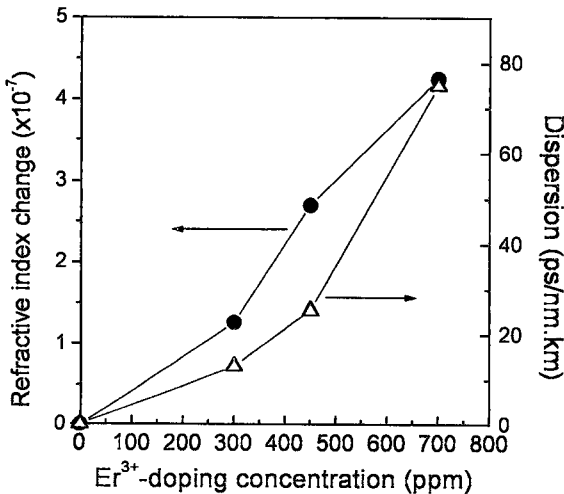


그림 6. 어븀 첨가 농도에 따른 광유도 굴절률 변화와 분산의 변화.

선모양 함수에 크게 의존함을 알 수 있다. 분산은 어븀첨가 광섬유 소재의 굴절률 n 과 준 안정 에너지 준위의 수명 시간 τ_2 , 로렌츠 선모양 함수와 펌프광 흡수 $\alpha_p L$, 어븀이온 첨가 농도 N , 모드중첩 Γ_s , 펌프광의 세기와 문턱펌프 세기 P_{th} 들에 의존함을 알 수 있다. 또 분산은 펌프광 세기에 대해 비선형적으로 증가하며 포화될 것임을 알 수 있다. 실험을 통해 얻은 분산 값을 그림 5에 제시하였다. 그림 6에는 실험에 사용한 어븀 첨가 광섬유들의 어븀 도핑 농도에 대하여 광유도된 최대 분산 변화 값을 비교 제시하였다. 이로부터 어븀이온 첨가율이 클수록 광유도된 분산 변화가 커짐을 알 수 있다.

V. 결 론

어븀 첨가 광섬유의 펌프 광에 의해 유도된 위상변화를 측정하기 위해 마하젠더 간섭계를 이용하여 간단하고 효과적인 실험구성을 하였으며, 신호광의 파장과 어븀 첨가율, 펌핑파위에 따른 간섭신호를 관측하여 위상 변화값을 측정하였다. 펌핑광의 파워가 증가할수록 위상변화가 커지다가 점점 포화되며 포화 영역에서 INFOs 300 ppm, 450 ppm, 700 ppm 어븀 첨가 광섬유들은 신호광 파장 1520 nm에서 0.27 radian, 0.84 radian, 0.7 radian으로 위상 변화가 측정되었고, 1540 nm에서 0.17 radian, -0.7 radian, -0.6 radian의 위상 변화를 갖는 것으로 측정되었다. 이로부터 구해진 굴절률 변화는 INFOs 300 ppm, 450 ppm, 700 ppm 어븀 첨가 광섬유들에 대해서 각각 1520 nm에서는 1.25×10^{-7} , 2.2×10^{-7} , 4.5×10^{-7} 로 증가함이 측정되었고, 1540 nm에서는 -0.8×10^{-7} , -2.14×10^{-7} , -4×10^{-7} 로 변화하는 것으로 측정되었다. 광펌핑에 의해 유도된 분산 특성은 공명파장 주위 ± 15 nm 파장 범위에서 큰 변화를 보이며 INFOs 300 ppm, 450 ppm, 700 ppm 어븀 첨가 광섬유들의 분산값 변화폭은 각각 약 28 ps/nm·km, 52 ps/nm·km, 168 ps/nm·km이었다. 펌프광의 세기가 커지면 광유도된 분산 변화 값이 증가하며 점차 포화되는 경향을 보이며, 어븀이온 첨가 농도가 클수록 광유도된 분산 변화도 커짐을 알 수 있다. 기존에 보고된 실험 구성에 비해 외부 환경 변화에 의한 측정 오차 축소형으로 짧은 팔을 서로 밀착시킨 간섭계 실험 구성을 통해 광유도된 굴절률 변화와 그에 따른 분산변화 특성을 어븀이온 도핑 농도와 펌핑파위에 대해 측정하였으며, 이와 같은 방법으로는 처음으로 다양한 첨가농도를 갖는 어븀 첨가 광섬유의 광유도된 굴절률 변화와 그에 따른 분산변화 특성을 함께 알아보았다. 실험적으로 구한 펌프광에 의해 유도된 굴절률 변화는 이론 모델을 통한 모의 계산 결과와 그 경향이 잘 일치하였다. 이로부터 어븀 첨가 광섬유의 어븀 이온 첨가율이 클수록 굴절률의 변화가 커짐을 알 수 있었고, 굴절률 변화에 따른 분산 변화 특성도 어븀 이온의 첨가율이 클수록 증가함을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 광유도된 어븀 첨가 광섬유의 굴절률의 변화와 분산 특성은 솔리톤(soliton) 시스템과 어븀 첨가 광섬유의 응용 소자의 동작 상태를 결정하는데 있어 중요한 요소이다. 그러므로 이와 같은 간단하면서도 효과적인 측정방법은 다양한 구조와 조성을 갖는 어븀 첨가 광섬유의 광유도된 굴절률

변화와 분산 특성을 측정하는데 사용될 수 있을 뿐 아니라 반도체 첨가된 유리(semiconductor doped glasses)와 다른 희토류 이온 첨가 광섬유, phosphorous-oxygen hole center fibers 등과 같은 다양한 종류의 광섬유의 광유도된 비선형 특성을 연구하는데 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] W. J. Miniscalco, *J. Lightwave Technol.*, **9**(2), 234 (1991).
- [2] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifier*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1994.
- [3] F. Stern, *Phys. Rev.*, **133**, A1653 (1964).
- [4] M. Romagnoli, F. S. Locati, F. Matera, M. Settembre, M. Tamburrini, and S. Wabnitz, *Opt. Lett.*, **17**(13), 923 (1992).
- [5] S. C. Fleming and T. J. Whitley, *Electron. Lett.*, **27**, 1959 (1991).
- [6] C. Thirstrup, Y. Shi, and B. Palsdottir, *J. Lightwave Technol.*, **14**(5), 732 (1996).
- [7] J. N. Sandoe, P. H. Sarkies, and S. Sparke, *J. Phys. D.*, **5**, 1788 (1972).
- [8] A. Yariv, *Optical Electronics*, Saunders College Publishing, 4th Ed., Orlando, FL 1991.

Light-induced changes of refractive indices and dispersions of Er³⁺-doped fibers of various doping concentrations

Seung Beom Kang and Ki Soo Lim

Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

Hak Kyu Lee, Dong Seong Lim and Kyong Hon Kim

Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejon 305-600, Korea

(Received October 14, 1998, Revised manuscript received January 7, 1999)

This study describes a simple and effective experimental determination of pump-power dependence of refractive indices and dispersions of erbium-doped fibers (EDFs) of various doping concentrations. Systematical analysis on light-induced change of the refractive indices and dispersion for a signal wavelength range of 1510 nm-1560 nm with a pump of 980 nm wavelength has been made by measuring the pump-induced phase changes of the signal beam in Mach-Zehnder type interferometer, which has an optically pumped EDF and a reference EDF in each of the two arms, respectively. The measured pump-induced refractive indices match well with the theoretically predicted ones. The results show that pump-induced refractivity and dispersion changes of the EDF increase with the increasing pump power and Er³⁺-doping concentration as expected from theory.