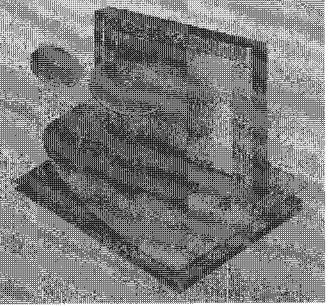


유한요소법을 이용한 중공광섬유의 도파 모드 분석과 그 응용



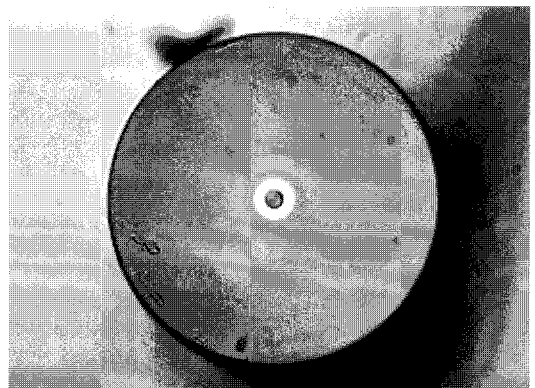
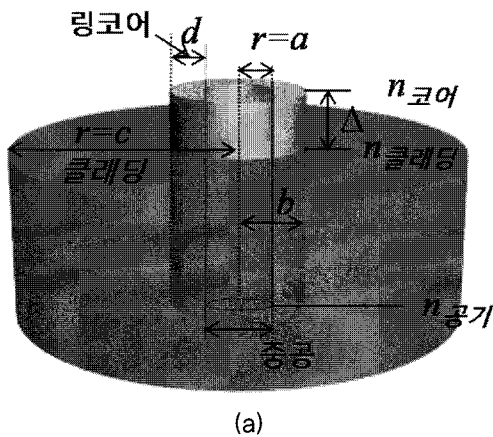
오경환 교수, 이세진 박사과정, 박지영 석사과정 (연세대학교 물리학과)

1. 서론

지난 1970년 저손실 데이터 전송이 가능한 광섬유의 개발로 고속의 정보교환이 가능해졌다 [1]. 당시 원형대칭성 구조로 제작되었던 광섬유는 1990년대부터 새로운 구조를 도입하여 - Microstructured Hole 광섬유 [5, 6] Omniguide 광섬유 [7, 8], 중공 광섬유 [9] - 이제는 통신뿐만 아니라 센서 [2], 고출력 레이저 [3], 내시경 [4] 등의 다양한 광소자로 응용분야가 확대되어 발전되어 왔다. 이 광섬유들은 그 구조에 따라 굴절률의 차이를 이용한 Index 도파 광섬

유와, 주기성 구조에 기인하는 Photonic Band-gap 효과를 이용한 Photonic Band Gap 광섬유로 나누어진다.

기존의 원형 대칭성을 가진 광섬유의 경우 Analytic Method를 이용하여 도파모드에 대한 정보를 분석할 수 있었지만, 앞서 제시한 새로운 구조의 광섬유들의 경우는 Analytic Solution의 획득이 불가능하다. 그렇기 때문에 날이 갈수록 증대되는 다양한 구조의 광섬유 수요에 부응하여, 이에 대한 구체적인 구조 설계 및 모델링을 위해 Analytic Method의 대안으로 수치해석을 이용한 분석 및 설계의 중요성도 함께 증대되고 있다. 광섬유의 설계



(a) 중공광섬유의 굴절률분포, (b) 중공광섬유의 단면.

그림 1. (a) 중공광섬유의 굴절률분포, (b) 중공광섬유의 단면.



및 분석에 사용되는 수치해석 방법으로는 Beam Propagation Method (BPM) [10], Planewave Expansion (PWE) Method [11], Finite Difference Time-domain (FDTD) Method [12], 그리고 Finite Element Method(FEM, 유한 요소법) 등이 있다 [13]. 이 중에서도 유한요소법은 정확도와 계산 결과의 높은 신뢰도를 바탕으로 광섬유 설계와 분석에 널리 이용되고 있다. 특히 편광 Maintain 광섬유와 같이 비대칭성을 지닌 구조에 대한 계산에서 더욱 위력을 발휘하며, 도파모드의 유효굴절율, 장분포, Cut-off 파장과 같은 특성을 계산하는데 매우 효과적이다.

저자가 발명한 중공광섬유의 모드결합 소자로의 활용 가능성은 장주기격자 (Long Period Grating) [14], 음향가변필터 (Acousto-optic Tunable Filter) [15] 등의 분야에서 제시되어왔다. 이 소자들의 모드결합에서는 코어의 기저모드와 클래딩의 여기모드들이 관여를 하게 되는데, 다양한 실험적 고찰과는 다르게 이에 대한 이론적 해석이 많이 부족했다. 앞서 언급한 유한요소법을 이용하면 중공광섬유 특유의 도파모드 및 그 특성에 대한 이론적 분석 역시 가능하다. 그 특성으로는 도파모드의 유효굴절율, 색분산 등이 있으며, 본 논문에서는 유한요소법으로 중공광섬유의 도파모드 및 특성을 분석하여 중공광섬유의 모드간섭 소자로의 응용성에 대해 제시하고자 한다.

2. 중공광섬유의 도파구조와 모드

중공광섬유는 광통신에 널리 쓰이고 있는 단일모드 광섬유와 마찬가지로 원형 대칭성을 지니고 있지만, 광섬유 중앙에 공기 Hole을 도입하여 특수한 삼중층을 구성한다. 중앙의 Hole은 환형의 Ge 도핑된 링코어로 둘러싸여 있으며, 이 환형 링코어 밖으로는 클래딩이 위치해있다. 그림 1에 나온 바와 같이, 중공광섬유는 Hole 주변의 링코어에서 높은 굴절률을 가지는 구조이며 전반사 원리에 의해 대부분의 빛이 링코어를 통해 도파되는 구조이다. 중공 광섬유에서 도파모드의 특성은 Hole과 링코어의 두께에

의해 결정된다. 그림 1에서 보는 바와 같이 중앙에는 반지름 'a' 와 $n_{\text{공기}}$ 의 굴절률을 가진 Hole이 위치하고 있고, $n_{\text{코어}}$ 의 굴절률을 가진 링코어가 두께 $d=b-a$ 로 있다. 그리고 $n_{\text{클래딩}}$ 의 굴절률을 가진 클래딩의 반지름은 'c'로 표현된다.

중공 광섬유의 가장 큰 장점은 중앙에 Hole을 내재함으로써 여기에 기체, 액체 또는 고체 Collid 등을 채워 광섬유 소자를 제작할 수 있다는 것이다. 또한 앞서 저자의 연구를 통해 타원형태의 링코어를 형성하여 높은 복굴절을 얻을 수 있음을 보였다 [16]. 그리고 중공광섬유의 링코어는 상용화된 통신용 단일모드 광섬유의 코어와 동일한 면적을 가지도록 조절할 수 있기 때문에 융착 접속을 할 경우 단일모드 광섬유와 중공 광섬유의 도파모드간 Adiabatic 모드 전이가 가능하다.

중공광섬유에서 링코어를 통해 도파되는 전자기파의 모드는 맥스웰 방정식을 기본으로 하고, 주어진 Boundary 조건에 따라 결정되는데, 이 때, 광섬유의 축을 따라 진행되는 모드의 Transverse 성분은 Longitudinal 성분 즉 E_z 로부터 그 값을 구할 수 있다. 그림 1에 나타난 도파구조의 축 성분, E_z 는 아래와 같이 주어지게 된다.

$$E_z(r, \theta) \tag{1}$$

$$= \begin{cases} AI_v(vr) \sin[(v\theta + \phi)] & (r < a) \\ (BJ_v(ur) + CN_v(ur)) \sin[(v\theta + \phi)] & (a \leq r \leq b) \\ DK_v(wr) \sin[(v\theta + \phi)] & (r > b) \end{cases}$$

$$\text{for } \begin{cases} v = \sqrt{\beta^2 - k^2} \\ u = \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2} \\ w = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2} \end{cases}$$

여기서 J_v, N_v, I_v, K_v 는 각각 정수의 v 값을 가진 베셀 함수를 의미한다. 식 (1)과 Boundary 조건을 적용하면 이로부터 특성방정식을 얻을 수 있고, Propagation Constant β 를 포함한 도파모드의 특성을 나타내는 값을 구할 수 있다. 이를 통해 Analytic 해를 구할 수 있지만, 중공광섬유의 경우 중앙의 Hole과 코어의 굴절율의 불연속적인 차이로 인해 Continuity 조건을 만족시키는 Coefficients를 찾는

데 어려움이 있다. 이에 대한 대안으로 수치해석적인 분석을 사용할 경우 높은 신뢰도와 정확성을 가진 해를 구하는 것이 가능하다. 중공광섬유의 모드 분석과 관련하여 기존에 시도된 수치 해석적 방법으로는 Finite Difference Time Domain (FDTD) Method [17]가 있지만 이는 실제적으로 사용되는 중공광섬유와는 거리가 먼 다중모드 특성을 가지는 비실제적이었다는데 그 한계가 있다. 이에 비해 본 연구에서 분석한 중공광섬유는 앞서 밝힌 바와 같이 상용화된 단일모드 광섬유와 자유로운 Mode 전이가 가능한 실용적인 도파구조를 가지고 있으며, 우리는 이 구조에 대해 광섬유의 도파구조 분석법 중 가장 큰 신뢰도를 얻고 있는 유한요소법을 이용해 도파모드의 특성을 분석하였다.

$$\nabla^2 \phi + k_0^2 [n^2(x, y) - n_{eff}^2] \phi = 0 \quad (2)$$

유한요소법에서 도파모드의 분석은 위의 식 (2)를 만족시키는 Scalar 파동 방정식 에서부터 시작한다. 그리고 분석 대상을 그림 2와 같이 삼각형 형태의 요소망 (Triangular Mesh)으로 나누고, Variational Principle로부터 행렬 방정식을 유도해내고 이에 해당하는 Eigenvalue를 유한요소법으로 풀게 된다.

그림 2는 중공광섬유의 세분화 시킨 영역의 단면

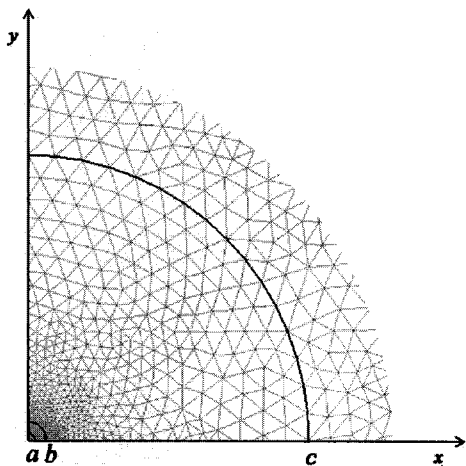


그림 2. 중공광섬유의 유한요소법 분석을 위한 Mesh.

을 나타내며, 우리는 링코어 영역을 1264개의 삼각형 요소망 성분으로, 클래딩 영역은 3480개의 성분으로 나누었다. 여기서 주목할 점은 링코어와 중공경계에서의 성분의 크기를 더욱 세밀하게 나누어 계산의 정확도를 높인 데 있다.

도파모드의 특성 중 유효굴절율의 분포와 함께 색분산은 매우 중요한 특성이며, 이에 대한 정확한 분석을 위해서는 Material Dispersion이 반드시 고려되어야 한다. 이를 고려하지 않을 경우 도파모드의 색분산 특성은 실제와 많은 차이를 보이게 되고, 이는 신뢰도가 낮은 분석 값을 이끌어낸다. 본 연구에서는 링코어에 해당되는 GeO₂가 도핑된 SiO₂와 클래딩에 해당되는 SiO₂의 굴절률값을 Sellmeier 방정식으로부터 얻어내 분석하였다. 여기서 사용된 방정식의 계수는 표 1에 나타나 있다. 이를 식 (3)과 (4)에 대입하면 각각 클래딩과 링코어의 굴절률 값을 구하는 것이 가능하다.

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - (l_i)^2} \quad (3)$$

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{[SA_i + X(GA_i - SA_i)] \lambda^2}{\lambda^2 - [SI_i + X(GI_i - SI_i)]^2} \quad (4)$$

여기서 SA, SI, GA, GI는 각각 SiO₂와 GeO₂에 대한 Sellmeier 계수이며, X는 도핑된 GeO₂의 몰분율을 의미한다.

유한요소법을 이용하여 얻은 분석한 코어모드의 기저모드와 다섯 개의 여기모드에 대한 특성은 그림 3에 나타나 있다. 분석에 사용된 파장은 800 nm이며, 여기서 중공광섬유는 Hole의 반지름이 1.5 μm, 링코어의 두께가 2.6 μm이고 코어와 클래딩의 굴절률 차는 약 0.45%이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 모든 코어모드는 대부분의 에너지가 링코어에 집중되어 있고, 환형을 띠고 있다. 그리고 전기장의 분포는 상용화 단일모드 광섬유와 매우 유사하므로 Hybrid 모드 분류법이 적용 가능하고, HE_{m_n}, EH_{m_n}, TE_{m_n}, TM_{m_n}으로 분류하였다.

그림 3에서 위의 세 도파모드는 대칭 모드이며, 기저모드인 (a) HE₁₁모드와 (b) HE₃₁, (c) EH₁₁ 모드는



표 1. SiO₂와 GeO₂에 대한 Sellmeier 방정식 계수(Malitson [24] and Fleming [25]).

A ₁	B ₁	A ₂	B ₂	A ₃	B ₃
SiO ₂					
0.69616630	0.68404300E ⁰¹	0.40794260	0.11624140	0.89747940	0.98961610E ⁰¹
GeO ₂					
0.80686642	0.68972606E ⁰¹	0.71815848	0.15396605	0.85416831	0.11841931E ⁰²

모두 이중 Degeneracy를 형성한다. 그리고 반대칭 (Antisymmetric)모드인 (d) TE₀₁과 (e) TM₀₁은 Non-degeneracy 모드이며 (f) HE₂₁ 모드는 앞의 세 모드와 마찬가지로 이중 Degeneracy를 보인다. 여기서 기저모드인 HE₁₁ 모드가 선형 편광을 보이는 결과는 매우 주목할 점이다. 그리고 중공광섬유가 단일 모드 광섬유에서의 도파모드와 가지는 차이점은 그림 4에서 확인 할 수 있다.

그림 4는 도파모드의 강도 분포를 등고선을 이용하여 나타내고 있다. 그림 4(a)의 HE₁₁모드를 보면 링코어 내부에서 양 측면으로 높은 강도의 분포를 보이며 이는 단일모드 광섬유와는 구분되는 특성이

다. 이러한 HE₁₁ 기저모드가 나타내는 비균일한 세기 분포는 예상치 못한 바이며, 지금까지 보고된 바가 없다. 에너지 분포의 특성은 링코어의 형태에서 전기장의 선형 편광을 유지하기 위해 코어의 양 측면으로 대칭적인 고점을 보인다고 해석할 수 있다. 이와는 반대로 TE₀₁과 TM₀₁모드에서는 전기장의 방향이 링코어의 형태와 잘 들어맞기 때문에 균일한 세기 분포를 보인다. 또한 그림 4에서 확인 할 수 있는 특징 중 하나는 HE₁₁ 기저모드와 다른 여기모드들 사이에 일치도가 다른 일반적인 Solid 코어 광섬유에 비해 높다는 점이다. 이는 중공광섬유의 모드 결합 소자로의 활용에서 이점이기에 그 가능성을 보

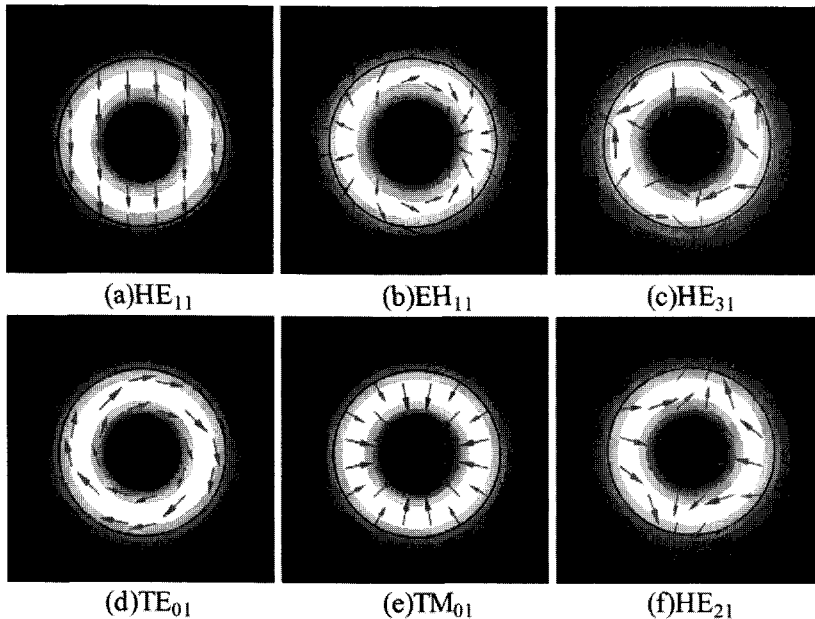


그림 3. 800 nm에서 중공광섬유 도파모드에 따른 전기장의 방향 분포 (a)~(c) 대칭모드, (d)~(f) 반대칭 코어모드.

인다고 할 수 있다.

최근 광섬유 소자 중 기저모드와 클래딩 모드 사이 결합이 다양하게 이용되고 있으며 대표적으로 장주기 격자와(LPG) [14], 음향가변필터 [15] 등이 있다. 장주기 격자에서는 코어 부분의 균일한 세기의 격자구조가 상일치 (Phase Matching)조건을 만족시키는 경우 기저모드와 대칭성을 가진 클래딩 모드가 결합을 일으킨다. 반대로 음향가변필터에서는 코어의 기저모드와 반대칭 클래딩 모드간의 상일치 조건을 만족하도록 만들어, 모드간의 결합 소자로 활용된다.

그렇기 때문에 우리는 모드 결합소자에 대한 심도 있는 분석을 위해 코어모드 외에도 그림 5와 같이 저차 클래딩 모드에 대해 분석하고 이를 대칭과 반대칭 모드로 구분하였다. 그림 5의 (a)-(f)는 반대칭 클래딩 모드를 나타내며, (g)-(i)는 대칭 모드를 나타낸다. 여기서 TE_{0x} 와 TM_{0x} 모드는 Nondegeneracy를 띠며, HE와 EH모드는 이중 Degeneracy를 보인다. 이 계산에선 우리는 $125 \mu\text{m}$ 을 클래딩의 지름으로 설정하였으며 주변은 굴절률 1의

에어로 둘러싸여 있다고 가정하였다. 또한 클래딩과 링코어 모두 Material Dispersion을 고려하여 계산하였다.

코어모드에서 중앙 Hole로 인해 전자기파의 강도가 특유의 도넛 모양을 나타낸 바와 같이 클래딩 모드 역시 상용화된 Solid 코어 광섬유와는 다른 세기 분포를 가진다. 일반적인 광섬유에서는 대칭모드의 경우 전자기파의 에너지는 중앙에서 가장 강하고 반대칭모드는 Node를 가지지만, 중공광섬유의 클래딩모드는 대칭 반대칭 구분 없이 모두 중앙이 빈 분포를 가지며 이로 인해 코어의 기저모드인 HE_{11} 모드와의 겹치는 정도가 일반적인 광섬유의 경우와는 다를 것임을 짐작할 수 있다. 그렇게 때문에 새로운 모드결합 소자로 중공광섬유는 매우 주목 받고 있다. 그림 5의 대칭 클래딩모드 중 TE_{01} , TM_{01} , HE_{22} 대칭모드는 코어의 기저모드 HE_{11} 과 Overlap Integral값의 증가가 다른 모드들에 비해 두드러진다. 그리고 반대칭모드 중에서는 HE_{12} 모드가 가장 큰 Overlap Intergral을 보일 것으로 예상된다.

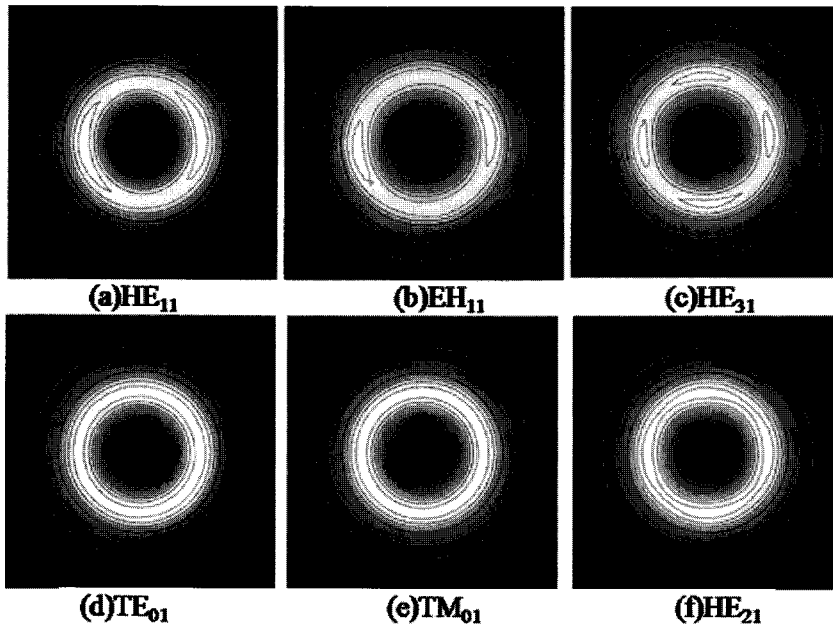


그림 4. 도파모드에서 전자기파의 강도 등고선 분포.

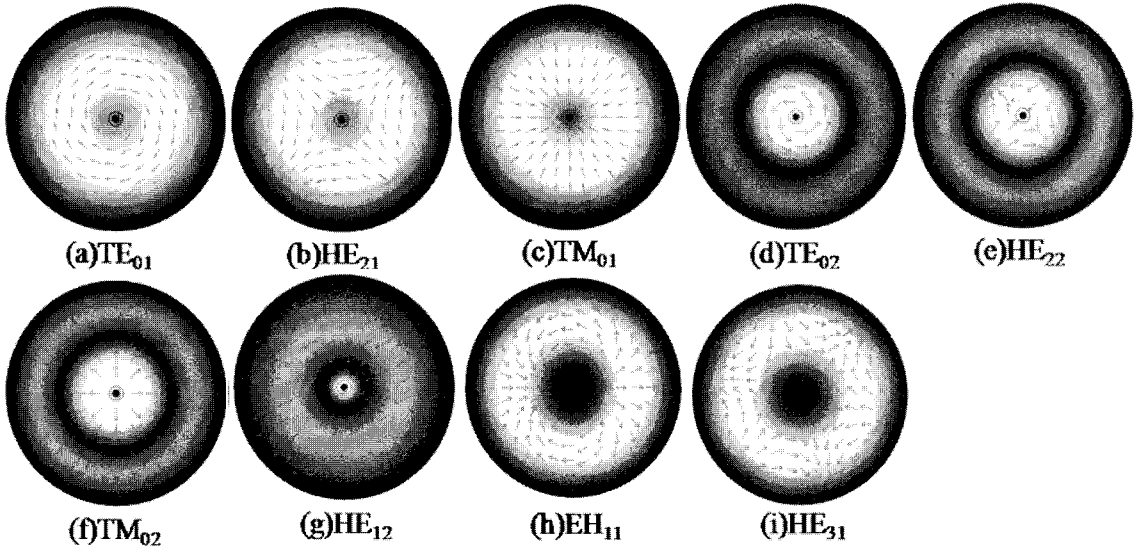


그림 5. 중공광섬유의 클래딩 모드에서 전자기파의 방향과 분포 (a)~(f) 반대칭모드, (g)~(i) 대칭모드.

도파로를 통해 도파되는 모드의 특성은 Normalized 주파수 V 에 대한 Generalized 도파 굴절률 b 의 함수로 나타낼 수 있다. 여기서 우리는

Generalized 도파 굴절률 $b = \frac{n_{eff}^2 - n_{clad}^2}{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$ 로 정의되

며, Normalized 주파수 $V = kd\sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$ 이다. 여기서 주의할 점은 코어모드와 클래딩 모드의 분석에서 사용되는 척도가 다르다는 것이다. 코어모드에서는 유효굴절률 n_{eff} 는 코어를 따라 도파되는

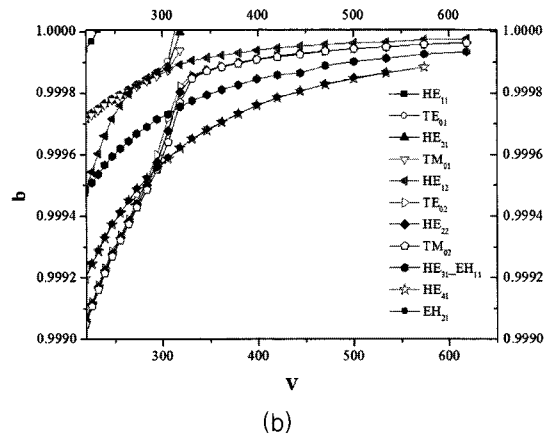
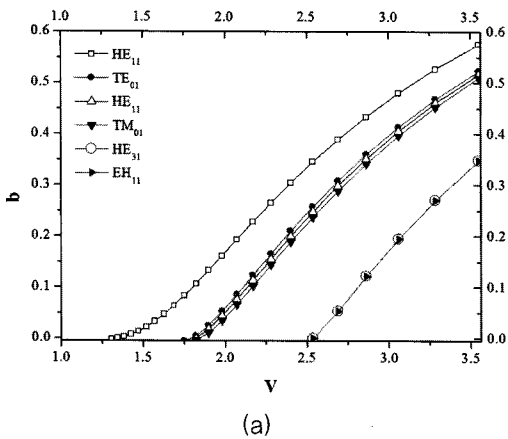


그림 6. Normalized 주파수 V 에 대한 Generalized 도파 굴절률 (a) 코어모드, (b) 클래딩모드.

표 2. 중공광섬유를 통해 도파되는 모드들의 Cut-off 주파수.

	HE ₁₁	TE ₀₁	HE ₂₁	TM ₀₁	HE ₃₁	EH ₁₁
Cut-off 주파수	1.34	1.79	1.82	1.84	2.53	2.53

모드에 해당되며, n_{core} 와 n_{clad} 는 Germanosilicate 링코어와 Silica Cladding의 굴절률을 의미한다. 그리고 d 는 링코어의 두께에 해당하는 값이다. 하지만 클래딩모드에서는 n_{eff} 가 클래딩을 따라 도파되는 모드에 해당하는 값이므로 n_{core} 와 n_{clad} 는 Silica 클래딩과 이를 둘러싼 공기층의 굴절률을 의미한다. 그리고 d 는 클래딩의 반지름을 나타낸다. 이 값을 적용해 얻은 V 에 대한 b 의 그래프는 그림 6에 (a) 코어모드 (b)클래딩모드에 대해 나타나있다.

중공 광섬유에서 도파 모드의 Cut-off 존재는 다른 광섬유들에 비해 두드러지는 특성 중 하나이다. 그림 6(a)를 보면 HE₁₁모드에 해당하는 b 값이 $V=1.25$ 부근에서 거의 0에 가까운 것을 볼 수 있다. 이러한 도파 모드의 Cut-off 값들은 표 2에 정리되어있다.

그림 6(a)에서 한 가지 더 주목할 점은 TE₀₁, TM₀₁, HE₂₁모드들이 서로 Degeneracy를 가지지 않고 명확히 구분된다는 사실이다. 중공광섬유의 링코어와 클래딩 사이의 굴절률 차이는 일반적인

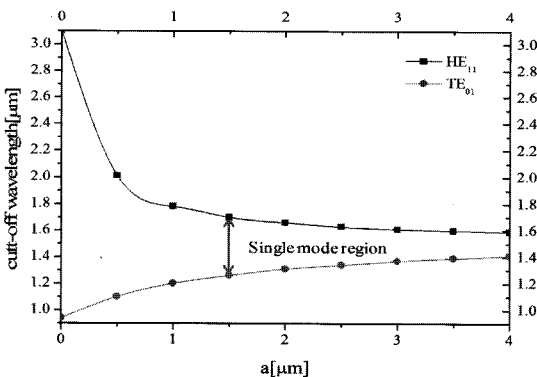


그림 7. 중공광섬유에서 도파되는 기저모드 HE₁₁과 첫 번째 여기모드 TE₀₁의 Cut-off 파장. 여기모드와 기저모드의 Cut-off사이에는 단일모드 영역이다.

단일모드 광섬유와 마찬가지로 이지만 중앙의 Hole과 링코어의 굴절률 차이로 인해 이 세 모드들이 동일한 Cut-off를 가지고 결합하여 LP₁₁모드를 형성하지 않게 된다. 즉, 중앙의 Hole과 링코어 사이의 높은 굴절률 차이는 모드간의 Non-degeneracy에 기여한다.

도파모드의 Cut-off를 계산함으로써 유추할 수 있는 정보로는 도파로의 단일모드 영역이다. 단일모드 영역은 기저모드와 그 바로 위의 여기모드(여기서는 HE₁₁과 TE₀₁)의 Cut-off사이를 의미하며, 이 파장대에서 도파되는 모드는 기저모드 뿐이다. 중공광섬유를 이루는 구조의 변수를 통해서 모드의 Cut-off를 조절할 수 있을 뿐 아니라, 단일모드 영역역시도 조절 가능하다. 여러 변수 중 특히 Hole의 크기가 이에 가장 큰 영향을 미치는데, 이에 따른 HE₁₁모드와 TE₀₁모드의 Cut-off 분포가 그림 7에 나타나 있다. 이 계산에서는 동일한 링코어의 두께에서, 서로 다른 Hole의 크기에 따른 Cut-off의 변화를 살펴 보았다. 결과에서 드러나듯이 중앙 Hole의 크기 a 가 증가할수록 단일모드 영역은 점점 좁아진다. 그리고 이 값은 대략 4 μm 의 Hole일 때 200 nm 정도의 값을 보인다.

그림 7을 보면 기저모드의 Cut-off는 Hole의 Size에 따라 크게 변하는 반면에 TE₀₁모드는 링코어의 외경에 더욱 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 일반적인 단일모드 광섬유와는 달리 중공광섬유에서는 Cut-off 파장과 단일모드 영역의 구간을 조절할 수 있음을 의미한다.

유효굴절률과 전자기파의 세기 분포, 모드의 Cut-off외에 색분산은 광통신 소자로 광섬유가 가지는 가장 중요한 특성 중 하나이다. 색분산은 간단히 Material Dispersion과 광섬유 구조로 인한 Dispersion에 의한 것이다. 그리고 이를 전체 색분산 (Total Dispersion)이라 부르며 그 값 DT 는 아래 식



(5)와 같이 표현된다.

$$D_T = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_c}{d\lambda^2} \quad (5)$$

기저모드인 HE₁₁ 모드에 대한 색분산에 대한 계산 결과는 그림 8에 나타나 있다. HE₁₁ 모드의 색분산은 1600 nm 근방에서 0값을 가지며 이는 1310 nm에서 Zero 색분산을 가지는 일반 단일모드 광섬유와 큰 차이를 보인다. 이러한 특이 색분산 특성은 U밴드에서 10 ps/nm·km 이하를 띤다. 그리고 1310-1550 nm 사이에서는 -21~9.35 ps/nm·km의 값을 보인다. 또한, 1550 nm 부근에서의 색분산의 기울기 역시 일반 단일모드 광섬유와는 반대 부호를 띤다.

이와 더불어 우리는 중앙의 공기 Hole의 크기에 따른 색분산의 변화를 일반 단일모드 광섬유의 (Hole의 크기가 0) 그것과 비교했고, 이는 그림 9에서 확인할 수 있다. 0부터 4 μm사이의 홀을 가지는 광섬유에 대해 계산하였으며 그 결과 중앙 공기 Hole을 도입함으로써 색분산이 전체적으로 감소하는 경향이 있음을 확인했다. 이는 중앙의 공기 Hole이 Germanosilicate Glass를 대신하며 전체적으로 Material Dispersion을 감소시킨데 기인한다고 보인다. 앞서 밝힌 바와 같이 Material Dispersion과 도파 구조 자체의 Dispersion의 합으로 볼 수 있고, Material Dispersion은 1.2-1.6 μm 구간에서 양의 값

을 가지고, Waveguide Dispersion은 음의 값을 가진다. 그렇기 때문에 도파로 중앙에 공기를 포함하게 될 경우 Material Dispersion을 감소시키는 효과가 있을 수 있고, 이는 색분산의 감소를 유도한다. 그리고 공기 Hole의 크기가 3 μm을 넘어설 경우 Dispersion이 크게 변하지 않지만 기울기가 영향을 받게 된다. 이는 HE₁₁ 모드의 장파장에서 Cut-off와 관련이 있다.

모드 결합 광섬유 소자는 가변필터, 밴드 통과필터 (Band Pass Filter), 밴드 차단필터 (Band Rejection Filter) 그리고 주파수 전환필터 (Frequency Shifter) 등에 다양하게 응용되도록 발전해왔다. 모드 결합 소자의 가장 기본적인 원리는 식 (6)에 나타난 Phase Matching 조건이다

$$\beta_{core} - \beta' = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (6)$$

여기서 β_{core}는 기저모드의 Propagation Constant를, β'은 기저모드와 결합하는 여기모드의 Propagation Constant이다. 그리고 Λ은 격자 주기에 의한 코어의 섭동 (Perturbation) 주기를 의미한다. 이 조건을 이용하여 LP₀₁모드를 LP₁₁모드로 [18] 혹은 LP₀₁모드를 LP₀₂모드로 [19] 전이시키는 광섬유 응용소자가 있으며, 이는 각각 장주기 격자와 음향가변필터에 해당한다. 그렇기 때문에 모드결합 소자에서는 Δβ에 대한 정보를 분석하는 것이 소자의

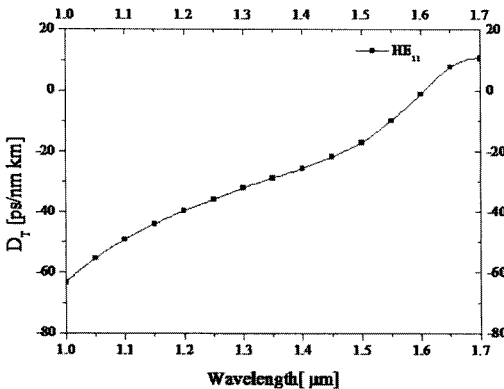


그림 8. HE₁₁ 코어모드의 색분산.

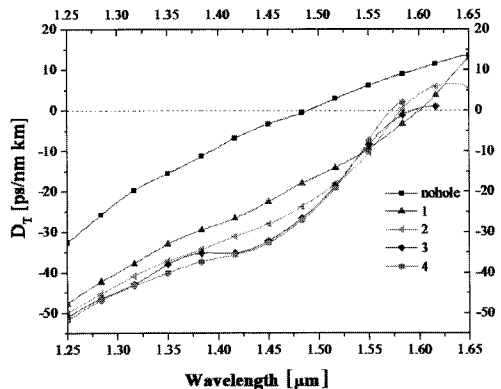
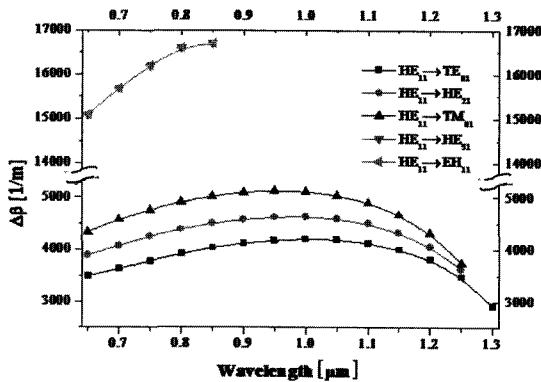


그림 9. 중공의 크기에 따른 색분산 분포.

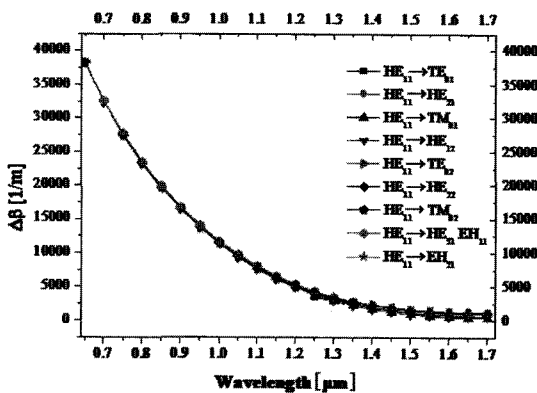
설계에서 매우 중요한 역할을 차지한다.

3. 중공광섬유의 모드결합소자 활용

본 연구에서 우리는 두 경우에 대한 $\Delta\beta$ 에 계산하였다. 첫 번째로 HE_{11} 모드와 다른 코어모드사이의 결합에 대해 분석하였고, HE_{11} 모드와 클래딩모드사이의 결합에 대해서도 계산하였으며, 그 결과는 그림 10에 요약되어있다. 모드결합 현상이 일어나는 대역폭은 $\Delta\beta(\lambda)$ 의 기울기 혹은 $d\Delta\beta/d\lambda$ 에 의해 결



(a)



(b)

그림 10. HE_{11} 코어모드와 (a) 기저 코어모드, (b) 클래딩 모드 사이의 $\Delta\beta$.

정된다고 알려져 있다. 이는 특정 파장 λ_0 에서 0에 가까운 값을 가지게 되면 모드결합의 대역폭이 넓어지게 된다. 반대로 $\Delta\beta(\lambda)$ 의 기울기가 커지면 그 소자는 좁은 대역폭을 가지게 된다.

그림 10을 보면 중공광섬유에서 코어모드간의 결합은 $\Delta\beta$ 값이 0.9-1.0 μm 대역에서 0에 가까운 기울기를 가진다. 그렇기 때문에 HE_{11} 모드와 반대칭모드인 TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} 모드와의 결합은 0.9-1.0 μm 에 걸쳐서 넓게 일어나리라 예상되며 실제로 중공광섬유를 이용한 음향가변필터에 관한 연구가 이를 뒷받침한다 [21]. 반대로 HE_{11} 모드와 HE_{31} , EH_{11} 등의 대칭모드와의 결합에서는 기울기가 단조증가 경향을 보이고, 결합이 좁은 영역에 걸쳐 일어날 것이라 예상할 수 있다.

그리고 코어모드와 클래딩모드 사이의 결합의 경우에는 대칭, 반대칭에 상관없이 $\Delta\beta$ 가 1.4 μm 까지는 단조감소 경향을 보이고, 1.4~1.6 μm 대역에서는 변화가 거의 없으며, 이 결과를 바탕으로 결합 대역폭을 예상해 볼 수 있다. 이와 관련하여 실험적으로 1.5 μm 에서 100 nm가 넘는 대역폭을 가진 모드 결합소자에 관한 저자의 연구 결과가 있다 [21].

4. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 중공을 내재한 삼층구조의 광섬유에서의 코어와 클래딩을 따라 도파모드의 유효굴절률, 에너지 분포, 색분산 등의 특성과 모드결합소자 설계를 위한 그 특성을 살펴보았다. 중공광섬유에서의 기저모드인 HE_{11} 모드는 링코어를 따라서 불균일한 에너지 분포를 가졌으며, 양단에 고에너지의 최댓값을 가지는 분포를 나타냈다. 그리고 TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} 의 여기모드들은 서로 간에 유효굴절률 차이로 Degenerated 상태로 도파되지 않음을 확인했다. 색분산의 특성으로는 중앙의 Hole를 내재함으로써, 1.2~1.7 μm 대역의 색분산이 감소하였고, 1.6 μm 의 파장에서 0의 색분산을 가질 것이라는 계산결과를 도출하였다. 이와 같은 중공광섬유의 도파모드들의 에너지 분포, Cut-off, 색분산 등의 특성은 광소자제어와 설계의 새로운 가능

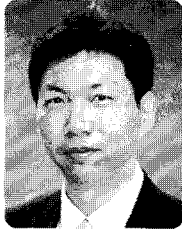


성을 제시한데 큰 의의가 있다.

참고 문헌

- [1] R. Olshansky, "Propagation in glass optical waveguides", *Review of Modern Physics*, 51, 2 (1979)
- [2] S. Sudo, I. Yokoyama, H. Yasaka, T. Ikegami, "Optical Fiber with Sharp Optical Absorptions by Vibrational-Rotational Absorption of C₂H₂ Molecules", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 2, pp. 128-131, Feb. 1990
- [3] C. Randy Giles, Emmanuel Desurvire, "Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 9, No. 2, pp. 271-283, Feb. 1991
- [4] Erek S. Barhoum, Richard S. Johnston and Eric J. Seibel, "Optical modeling of an ultrathin scanning fiber endoscope, a preliminary study of confocal versus non-confocal detection", *Opt. Express*, Vol.13, No. 19, pp. 7548, Sep. 2005
- [5] J. C. Knight et al., "New ways to guide light," *Science*, vol. 296, pp. 276-277, Apr. 2002.
- [6] P. Russell, "Photonic crystal fibers," *Science*, vol. 299, pp. 358-362, Jan. 2003.
- [7] Y. Fink et al., "Guiding optical light in air using an all-dielectric structure," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 2039-2041, Nov. 1999.
- [8] B. Temelkuran et al., "Wavelength-scalable hollow optical fibres with large photonic bandgaps for CO₂ laser transmission," *Nature*, Vol. 420, pp. 650-653, Dec. 2002.
- [9] K. Oh, S. Choi, Yongmin Jung, Jhang W. Lee, "Novel Hollow Optical Fibers and Their Applications in Photonic Devices for Optical Communications", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 23, No.2, Feb. 2005
- [10] B. J. Eggleton, P. S. Westbrook, C. A. White, C. Kerbage, R. S. Windeler, and G. L. Burdge, "Cladding-mode resonances in air-silica microstructure optical fibers," *J. Lightw. Technol.*, vol. 18, no. 8, pp. 1084-1100, Aug. 2000.
- [11] A. Ferrando, E. Silvestre, J. J. Miret, and P. Andrés, "Vector description of higher-order modes in photonic crystal fibers," *J. Opt.Soc. Amer. A*, vol. 17, no. 7, pp. 1333-1340, Jul. 2000.
- [12] M. Qiu, "Analysis of guided modes in photonic crystal fibers using the finite-difference time-domain method," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 30, no. 5, pp. 327-330, Sep. 2001.
- [13] M. Koshiba and K. Saitoh, "Numerical verification of degeneracy in hexagonal photonic crystal fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 12, pp. 1313-1315, Dec. 2001.
- [14] A. M. Vengsarkar et al., "Long period fiber gratings as band rejection filters", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 14, 58-65, Jan. 1996
- [15] H. S. Kim et al., "All-fiber acousto-optic tunable notch filter with electronically controllable spectral profile", *Opt. Letters*, vol. 22, pp. 1476-1478, Oct. 1997
- [16] Y. Jung et al., "Versatile control of geometric birefringence in elliptical hollow optical fiber", *Opt. Letters*, vol. 13, 2681-2683, Sep. 2006
- [17] Kun-Wook Chung, Jaeheung Shin, and Shizhuo Yin, "Accurate hybrid mode analysis of hollow optical fibers", *Optical Engineering* 45(6), 065008, Jun. 2006
- [18] K. O. Hill, B. Malo, K. Vineberg, F. Bilodeau, D. Johnson, and I. Skinner, "Efficient mode-conversion in telecommunication fiber using externally written gratings," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 1270-1272, 1990
- [19] F. Bilodeau, K. O. Hill, B. Malo, D. Johnson, and I. Skinner, "Efficient narrowband LP₀₁ <-> LP₀₂ mode convertors fabricated in photosensitive fiber: Spectral response," *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 682-684, 199
- [20] Y. Jung, S.B. Lee, Jhang W. Lee, and K. Oh, "Bandwidth control in a hybrid fiber acousto-optic filter", *Opt. Letters*, vol. 30, no.1, pp.84-86, Jan. 1984

저자약력



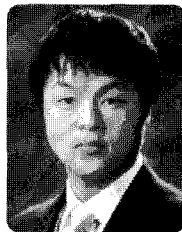
성 명 : 오경환

◆ 학 력

- 1981년 서강대학교 전자공학과 공학학사
- 1983년 서강대학교 대학원 전자공학과 공학석사
- 1992년 서강대학교 대학원 전자공학과 공학박사

◆ 경 력

- 1994년 - 1996년 LG 전선 광통신연구소 선임연구원
- 1996년 - 2006년 광주과학기술원 정보통신공학과 교수
- 2000년 - 2002년 미국 Lucent Bell Lab 초빙 연구원
- 독일 Alexander von Humboldt Research Fellow
- 영국 Chevening Scholar
- 일본 JSPS Invitation Fellow
- 2006년 - 현재 연세대학교 물리학과 교수



성 명 : 이세진

◆ 학 력

- 2007년 연세대학교 물리학과 이학사
- 현재 연세대학교 대학원 물리학과 박사과정



성 명 : 박지영

◆ 학 력

- 2009년 연세대학교 물리학과 이학사
- 현재 연세대학교 대학원 물리학과 석사과정

