

편광제어에 의한 파장가변 고리형 광섬유레이저에서의 파장천이특성

정회원 김익상*, 김창봉**

The Characteristics of Wavelength Shift in Fiber Ring Laser Tuned by Polarization Control

Ik-Sang Kim*, Chang-Bong Kim** *Regular Members*

요 약

광섬유고리에 편광제어를 통해 여러 광경로들에 대해서 손실을 조정함으로써 손실이 작은 광경로에서 발진하게 함으로써 발진 파장을 가변시킬 수 있는 편광제어 파장가변 고리형 광섬유레이저를 구현하였다. 1.5 mm의 공극을 가진 내부공진편광기를 사용하여 1nm의 중모드간격으로 발진을 일으킬 수 있었고 편광제어기 및 내부공진편광기를 조절해서 1540~1560 nm의 파장가변을 시킬 수 있었다. 또한 실험적으로 나타난 발진특성을 광경로와 복굴절 손실의 개념을 사용하여 발진출력의 파장천이특성을 분석하였다.

ABSTRACT

Wavelength tunable fiber ring laser can be tuned by causing a resonance on the optical path having the least loss which is controlled by a polarization adjustment. It is observed that lasing wavelengths having 1 nm FSR(Free Spectral Range) can be tuned over the range of 1540~1560 nm when a polarization controller and an intra-cavity polarizer with 1.5 mm air gap are adjusted. The characteristics of wavelength shift in the laser output are analyzed by introducing an optical path modeling and the concept of a birefringence loss.

1. 서론

파장가변 레이저는 센서, 분광학, 파장분할 다중화 광신호를 이용하는 시스템, 또는 coherent 통신에서 국부발진 용도를 위해 매우 중요한 광원으로 사용된다. 이러한 레이저는 여러 가지의 형태로서 연구된 바가 있는데 크게 두 가지의 형태로서 대별된다고 볼 수 있다. 하나는 외부 공진기를 이용하여 파장을 가변시키는 DBR (Distributed Bragg Reflector) 레이저, 또는 고리형태의 광섬유를 이용하여 고리 안에 반도체 광증폭기(Semiconductor Optical Amplifier ; SOA), 또는 어븀첨가 광섬유

(Erbium Doped Fiber)와 같은 이득매질을 두고 electro-optic Lithium Niobate 변조기^[1], Fabry-Perot tunable filter^[2], acoustooptic tunable filter^[3] 등과 같은 소자들을 tuner로서 이용하여 파장 가변을 시키는 형태로 구성되어 있다.

파장가변 레이저의 성능은 응용분야에 따라 다르지만 기본적으로 스위칭 속도, 가변파장 범위, 선폭, 파장의 안정도 등이 중요한 인자가 된다. DBR 레이저의 경우 스위칭 속도는 다소 빠르나 선폭이 수 MHz, 파장가변 범위가 수 nm에 불과하다.^[4] 반면에 파장 가변 범위가 가장 큰 것으로서 acoustooptic tunable filter를 파장 tuner로서 사용하여 80 nm 정도의 파장가변 범위를 가지는 예가 있다.^[3]

* 배재대학교 정보통신공학부(iskim@mail.paichai.ac.kr),

** 공주대학교 정보통신공학부(aggie@knu.kongju.ac.kr)

논문번호 : 00116-0402, 접수일자 : 2000년 4월 2일

또한 광섬유 고리의 광로상의 편광 제어 방법의 한 고리형 광섬유 레이저의 경우를 들 수 있는데 0.1 nm 이하의 선폭과 1.3 μm 근처에서 30 nm 정도의 가변파장 범위를 가진 연구 결과가 발표된 바 있다.^[5]

본 연구에서는 반도체 광증폭기(SOA)를 이득 매질로서 이용하고 편광제어기(polarization controller)와 내부공진편광기(intra-cavity polarizer)로 구성된 파장 tuner를 이용하여 발진파장을 가변시키는 고리 형태의 광섬유레이저를 구현하고 그 특성에 대해 논하고자 한다. II절에서는 이러한 편광 제어에 의해 결정되는 광섬유 고리상의 복굴절 분포의 조합에 따른 광경로와 각 광경로에서 복굴절손실이라는 개념을 정의하여 복굴절손실이 작은 광경로에서 발진 가능하다는 이론적 배경을 설명하고 III절에서는 실험을 통하여 나온 결과와 분석을 통하여 발진파장을 가변시키는 메커니즘을 논하고자 한다.

II. 편광제어를 이용한 파장가변 고리형 광섬유레이저의 기본 이론

그림 1.은 편광제어에 의한 발진파장을 가변시킬 수 있는 원리를 개념적으로 설명해 준다. 두 거울 사이에 두 직교하는 방향에 대해서 전파특성을 달리하는, 다시 말해 굴절율이 다른 복굴절소자가 있다고 할 때, (a)의 경우는 파장 λ₁에서 cavity사이를 왕복한 후 위상정합을 만족하여 이 파장에서 발진이 일어날 것이고 (b)와 같이 복굴절소자를 90° 돌리면 다른 광축이 놓이게 되어 λ₂에서 발진이 일어날 것이다. 이러한 원리를 바탕으로 복굴절특성을 가지는 광섬유고리형태를 구성하여 cavity를 형성할 수 있다. 광섬유고리상에는 복굴절소자로 구성되며 그림 2.와 같이 모델링할 수 있다. 두 개의 서로 다른 실효굴절율을 가지는 직교광축으로 구성된 n 개의 복굴절 소자의 조합을 생각해 보자. 이득매질이 SOA의 경우 상호 직교하는 TE, TM 모드가 존재하는데 이러한 초기에 여기된 자연방출광파 field를 E로 표시할 수 있으며 복굴절소자를 통과하여 같은 지점으로 귀환된 광파의 field E'는 식(1)와 같이 표시할 수 있다.

$$E = \begin{pmatrix} E_{TE} \\ E_{TM} \end{pmatrix}, E' = \begin{pmatrix} E'_{TE} \\ E'_{TM} \end{pmatrix} \quad (1)$$

i 번째 복굴절 소자는 다른 실효굴절율에 의해 전



그림 1. 편광제어에 의한 발진 파장의 가변

파상수 β_{xi}, β_{yi}를 가지는 두 개의 직교하는 광축으로 구성되며 이는 식(2)과 같이 행렬 B_i로 표시된다.

$$B_i = \begin{pmatrix} e^{-i\beta_{xi}L_i} & 0 \\ 0 & e^{-i\beta_{yi}L_i} \end{pmatrix} \quad (2)$$

n 개의 복굴절 소자들이 각각 인접한 광축에 대하여 그림 2.와 같이 φ의 각으로 엇갈려 있다고 할 경우 식(3)과 같이 행렬 T₁로 표현된다.

$$T_1 = \begin{pmatrix} \cos \phi_1 & -\sin \phi_1 \\ \sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

이러한 복굴절 소자들로 구성된 광섬유고리를 한 바퀴 돌아온 광파 E'는 식(4)와 같이 표시된다.

$$E' = e^{-\alpha L/2} (B_n T_n \times \dots \times B_2 T_2 \times B_1 T_1) E \quad (4)$$

여기서 복굴절 소자들의 두 광축의 손실이 동일하다고 가정하고 다른 점합손실들을 포함한 동기손실 계수 α를 고려하였다.

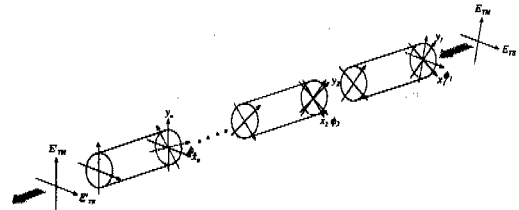


그림 2. 복굴절 광섬유고리

이로부터 인접한 복굴절 소자들의 광축이 이루는 각 φ에 의해 광경로가 형성되며 이러한 광경로들을 전파하는 광파들의 field 크기는 광경로에 따라 달라지며 이를 복굴절손실, B_k라고 정의한다. 표 1.에 8 가지의 광경로에 대한 복굴절손실 특성을 보여 주고 있다. 여기서 c는 cosφ, s는 sinφ를 나타내고 특기할 점은 표 1.에서 보는 것처럼 다음과 같은 관계가 성립된다는 점이다. k는 k의 이진 보수이다.

$$B_k^{TE} = B_k^{TM} \quad (k=0 \sim 3) \quad (5.a)$$

$$B_k^{TE} = -B_k^{TM} \quad (k=4 \sim 7) \quad (5.b)$$

표 1. 광경로에 따른 복굴절손실 특성

광경로 k	이진표기	광축	복굴절 손실		특기 사항
			TE 입력 B_k^{TE}	TM 입력 B_k^{TM}	
0	000	$x_1x_2x_3$	$c_1c_2c_3$	$c_1c_2(-s_3)$	B_k^{TE}
1	001	$x_1x_2y_1$	$c_1(-s_2)s_1$	$c_1(-s_2)c_1$	TE입력/TE출력
2	010	$x_1y_2x_1$	$(-s_1)s_2c_1$	$(-s_1)s_2(-s_1)$	B_k^{TM}
3	011	$x_1y_2y_1$	$(-s_1)c_2s_1$	$(-s_1)c_2c_1$	TM입력/TE출력
4	100	$y_1x_2x_1$	$s_1c_2c_1$	$s_1c_2(-s_1)$	B_k^{TE}
5	101	$y_1x_2y_1$	$s_1(-s_2)s_1$	$s_1(-s_2)c_1$	TE입력/TM출력
6	110	$y_1y_2x_1$	$c_2s_2c_1$	$c_2s_2(-s_1)$	B_k^{TM}
7	111	$y_1y_2y_1$	$c_2c_2s_1$	$c_2c_2c_1$	TM입력/TM출력

식(5.a)는 여기광파의 TE 성분이 귀환광파의 TE 광축으로 이어지는 광경로(표 1.에서 TE입력/TE출력 광경로에 해당)들과 여기광파의 TM 성분이 귀환광파의 TM 광축으로 이어지는 광경로(표 1.에서 TM입력/TM출력 광경로에 해당)들의 복굴절 손실이 같아 TE 및 TM 성분들이 각기 다른 파장에서 동시에 발진할 수 있다는 점을 시사해 주고 있다.

광경로 k에 따라 복굴절율의 조합이 달라지므로 위상정합조건을 만족하는 발진파장 λ_k 가 광경로 k에 의해 고유하게 정해진다.

$$\varphi_k = \sum_{i=1}^3 \beta_{k,i}(\lambda_k) L_i = \begin{cases} 2m\pi & ; B_k^{TE/TM} > 0 \\ (2m+1)\pi & ; B_k^{TE/TM} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 TE입력/TE출력 및 TM입력/TM출력에 해당하는 광경로의 경우만이 발진을 위한 위상정합조건이 된다. 반면에 TE입력/TM출력 및 TM입력/TE출력에 해당하는 광경로의 경우에는 식(6)이 발진을 위한 위상정합조건이 되지 못한다. 왜냐하면 SOA의 TE 및 TM 자연방출광 사이에는 상관성이 작고 같은 파장에 대해서 위상이 다르기 때문에 가령 이러한 여기광파의 TE 성분이 고리를 한 바퀴 돌아 SOA의 TM 광축으로 입사될 때 귀환 광파에는 TE 성분의 초기위상에 2π 의 정수배 만큼의 위상지연이 포함되어 있다고 가정하면 자연방출광의 TM 성분과 위상정합이 되지 못하기 때문이다.

광경로에 따라 위상정합조건을 만족하는 파장의 광파들은 앞서의 복굴절손실 $B_k^{TE/TM}$ 에 의해 저마다 SOA에 입력되는 field의 크기가 달라지므로 입력광 파워가 다르다. 입력광파워가 가장 큰 광경로에 해

당하는 파장이 발진 파장이 되는데 이는 각 파장에 대한 이득이 총체적으로 carrier inversion과정을 통하여 전적으로 각 파장의 이득특성에만 의존적이기 때문이다. 요컨대 고유한 발진파장을 가지는 광경로들에 대해 복굴절 손실들이 이루는 각 θ 의 조합에 따라서 복굴절손실을 제어할 수 있으므로 이러한 복굴절손실이 가장 작은 광경로에 대해서 발진이 일어나도록 하는 것이 편광제어를 이용하여 발진파장을 가변시키는 원리라고 할 수 있다.

III. 편광제어를 이용한 파장가변 고리형 광섬유레이저의 실험결과 및 분석

1. 편광제어기의 조절에 따른 출력 스펙트럼의 특성

그림 3.은 파장 가변을 위해 편광제어기(polarization controller)와 편광기(polarizer)를 사용한 고리형 광섬유레이저를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용된 SOA는 cavity의 반사율이 매우 작게 되어 있는 TW(Travelling Wave) 형태이며 100 mA의 주입전류에 대해 포화광출력이 6dBm, 침투이득파장이 1542 nm, TE 대 TM 이득차이가 0.6dB이다.

본절에서는 고리 형태의 광섬유로 구성된 광경로상의 복굴절 특성을 이용해 다수의 상이한 광경로를 허용함으로써 각각의 광경로에 대한 발진 파장이 존재하도록 편광제어기를 사용하고 편광기는 셋업에 포함시키지 않는다. 편광제어기와 광섬유 고리에 의해 형성된 광경로의 길이가 길기 때문에 증폭드란격(FSR, Free Spectral Range)은 매우 작다. 따라서 이러한 경우에는 좁은 선폭의 발진을 기대할 수 없고 그림 4.과 같이 그림 3.의 셋업에서 편광제어기의 $\lambda/4$ plate를 돌림에 따라 넓은 파장대역에서 파워를 가지는 출력 스펙트럼의 모습을 보여준다.

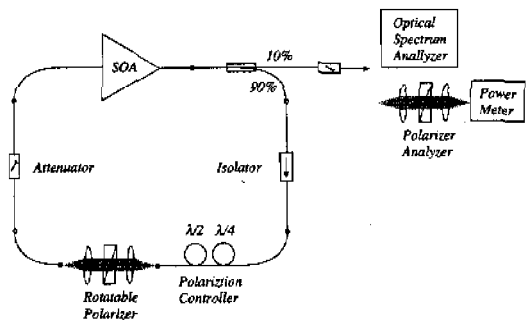


그림 3. 편광제어 파장가변 고리형 광섬유레이저의 실험셋업

두 개의 광섬유무프를 사용하여 $\lambda/2$ plate, $\lambda/4$ plate로 구성된 편광제어기를 그림 2.에서 복굴절소자1은 $\lambda/4$ plate, 복굴절소자2는 $\lambda/2$ plate, 복굴절소자3은 SOA로서 단순화된 모델링을 통해 실험 결과를 분석해 보고자 한다. 이로부터 앞서의 표 1.과 같이 8 가지의 광경로에 대한 복굴절 손실을 유도할 수 있다. 여기서 ϕ 및 ϕ' 는 고정값이고 $\phi = \phi' - \phi$ 이다. 또한 앞서 언급한대로 TE 및 TM 여기광파가 귀환되어 TE 및 TM 광축에 입사될 경우에만 발진을 위한 위상정합조건을 만족할 수 있다고 가정한다.

그림 3.의 셋업에서 $\lambda/4$ plate를 돌림에 따라 두 개의 광섬유무프로 구성된 편광제어기와 SOA에 의해 형성된 8가지의 광경로에 대한 복굴절손실을 알아보기 위해 주어진 ϕ' 및 ϕ 에 대해 ϕ 의 변화에 따른 각 광경로의 복굴절손실은 그림 5.와 같은 대표적인 복굴절손실의 양상을 보여준다

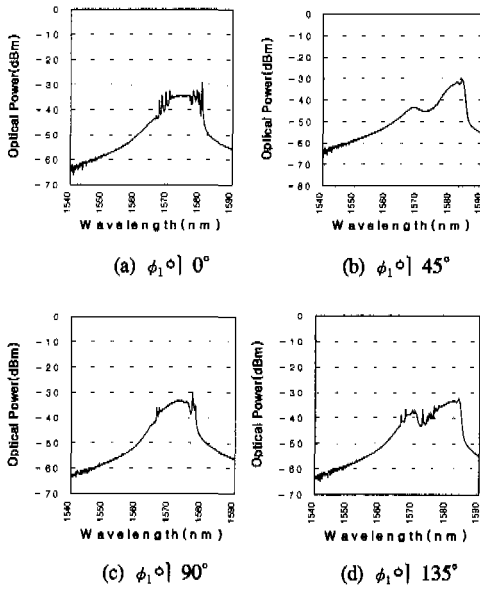


그림 4. 편광제어기의 $\lambda/4$ plate를 돌림에 따른 출력 스펙트럼의 변화

그림 5.(a), (b)의 경우가 가장 많이 나타나는 양상으로 ϕ 이 0° 에서는 TE 및 TM 모드가 각각 하나의 광경로0(TE_0) 및 광경로7(TM_7)에 대해서만 복굴절손실이 작아 이 광경로에서 발진이 일어날 가능성이 많음을 시사해 준다. ϕ 이 45° 에서는 그림 5.(a)의 경우 TE 및 TM 모드가 각각 두 개의 광경로0,1($TE_{0,1}$) 및 광경로6,7($TM_{6,7}$)에 대해서 복굴절손실이 같아 동시에

두 개의 광경로에서 발진이 일어날 가능성이 많다. 그리고 그림 5.(b)의 경우는 TE 및 TM 모드가 각각 네 개의 광경로0,1,2,3($TE_{0,1,2,3}$) 및 광경로4,5,6,7($TE_{4,5,6,7}$)에 대해서 복굴절손실이 같아 동시에 네 개의 광경로에서 발진이 일어날 가능성이 많음을 알 수 있다. ϕ 이 90° 에서는 TE 및 TM 모드가 각각 하나의 광경로1(TE_1) 및 광경로6(TM_6)에 대해서만 복굴절손실이 작아 이 광경로에서 발진이 일어나는데 ϕ 이 0° 인 경우와 비교할 때 광경로가 다름을 주시해 볼 필요가 있다. ϕ 이 135° 에서는 다수의 발진가능한 광경로들이 ϕ 이 45° 인 경우와 비교할 때 같음을 알 수 있다.

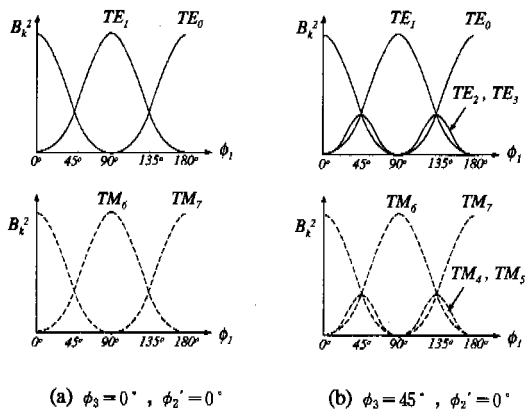
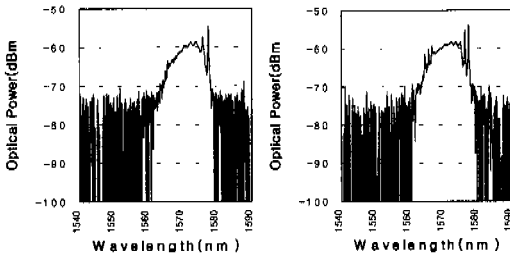


그림 5. $\lambda/4$ plate를 돌림에 따른 광경로의 대표적인 복굴절손실

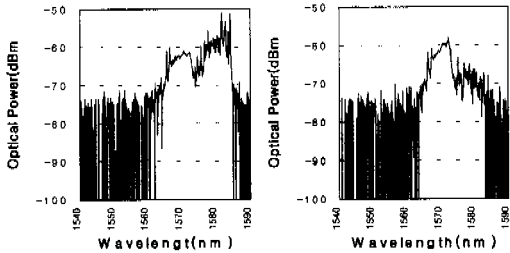
그렇다면 이러한 분석을 토대로 그림 4.의 출력 스펙트럼이 나타날 수 있는 이유를 다음과 같이 해석할 수 있다. 먼저 그림 4.의 출력 스펙트럼은 90° 주기로 거의 같은 모습을 띠고 있고 한 번은 單峰을 보여 주고 다음 한 번은 雙峰의 형상을 보여 주는데 이는 다음 절에서 설명하게 될 편광기를 삽입한 경우의 출력 스펙트럼의 양상과 거의 같다. ϕ 이 0° 및 90° 에서 TE 및 TM모드는 복굴절손실이 작은 광경로가 하나씩 존재하고(ϕ 이 0° 일 때 $TE_0 + TM_7$, ϕ 이 90° 일 때 $TE_1 + TM_6$) 또한 광경로가 달라 파위가 많이 나타나는 파장대역의 중심파장이 다르다고 생각할 수 있다. 그러나 전체 광섬유코어의 길이가 길어 종모드간격은 수십 MHz로 매우 작기 때문에 그림 4.의 (a), (c)와 같이 파위가 많이 나타나는 파장대역의 중심파장이 대략적으로 별차이가 없고 單峰을 형성할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 추정할 수 있는 이유는 다음 절에서 편광기를 삽입한 경우의 출력 스펙트럼의 양상에서 볼 때 더

욱 명확해짐을 이해할 수 있을 것이다.

ϕ 이 45° 및 135°의 경우 그림 5.(a)에서 TE 모드는 광경로0와 광경로1에서 복굴절손실이 같고 TM 모드는 광경로6와 광경로7에서 복굴절손실이 같다. 만약 앞서와 같이 광경로에 따른 발진파장의 변화가 미미하다고 가정하면 TE₀₁ 및 TM₆₇의 경우 각각 발진파장이 거의 같아서 單峰을 형성해야 하겠지만 그림 4.(b), (d)의 출력 스펙트럼의 결과는 雙峰을 형성한다. 이로부터 TE₀₁과 TM₆₇은 자기 다른 발진파장 대역을 형성하거나 또는 TE₀₁과 TM₆₇ 모두 똑같은 쌍봉의 발진파장 대역을 형성할 수 있음을 유추할 수 있다. 두 가지의 경우 모두 다 TE 및 TM 모드는 각각 광경로0,1 및 광경로6,7 상에 위상정합을 만족하는 파장들간에 간섭성이 있다는 사실을 추정해 볼 수 있을 것이다.



(a) ϕ_1 이 0°, 90° 일 때 單峰의 경우 TE, TM이 섞여 있다.



(b) ϕ_1 이 45°, 135° 일 때 雙峰의 경우 좌측봉은 TM, 우측봉은 TE

그림 6. 출력의 TE와 TM 모드

TE와 TM을 분리해내기 위해 레이저 출력을 편광분석셋업을 이용하여 편광기를 0° 및 90° 돌림에 따라 그림 6.과 같이 스펙트럼이 나타난다. 그림 6.(a)는 單峰의 경우로서 앞서의 분석과 마찬가지로 TE 및 TM의 복굴절손실이 작은 광경로가 다를지라도 발진파장 대역은 거의 같음을 보여준다. 반면에 그림 6.(b)는 雙峰의 경우로서 TE₀₁ 및 TM₆₇에서 TE 및 TM 모드는

각각 상이한 광경로간에 간섭으로 인해 각각의 발진파장대역이 다름을 볼 수 있다.

2. 내부공진편광기의 조절에 따른 출력 스펙트럼의 특성

그림 3.의 셋업에서 편광제어기와 감쇠기 사이에 편광기를 사용하는데 이러한 편광기를 사용하는 이유는 가변 파장대역을 늘리고 내부공진기(intra-cavity)를 형성함으로써 발진선폭을 줄여주는 효과가 있어 이를 내부공진편광기(intra-cavity polarizer)라고 한다.^[6]

편광기를 부착하고 고리를 끊었을 때 편광기 출력의 스펙트럼은 그림 7.과 같이 나타난다. 여기서 편광기의 전달특성이 Fabry-Perot 형태가 됨을 알 수 있으며 다음과 같이 표시된다.

$$H_p(\nu) = \frac{T e^{-\Delta\phi/2}}{1 - R e^{-\Delta\phi}}, \quad \Delta\phi = \frac{2\pi\nu}{c} \cdot 2d \quad (7)$$

여기서 $\Delta\phi$ 는 d 길이의 공극으로 구성된 편광기내의 one-round trip 위상변화이다. 그리고 T 및 R 은 pigtail된 광섬유와 공극 경계면에서의 파워투과율 및 반사율이다. 종모드간격은 내부공진편광기의 간격 d 와 공극의 굴절율을 1이라고 할 때 식(8)과 같이 표시된다.

$$\Delta\nu_p = \frac{c}{2d} \quad (8)$$

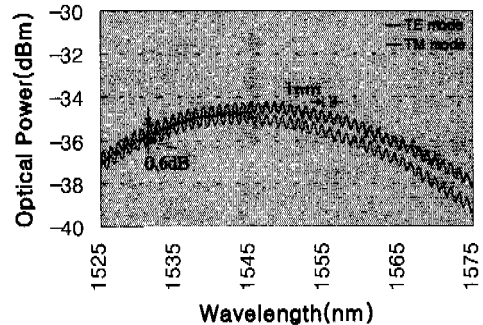


그림 7. 내부공진편광기의 Fabry-Perot 전달특성

그림 7.에서 종모드간격은 약 1nm정도로서 식(8)로부터 편광기의 cavity 간격은 1.5 mm정도가 됨을 알 수 있다. 또한 스펙트럼의 최대 최소 비율이 0.6 dB로부터 식(7)을 이용하여 계산하면 편광기의 광섬유로부터의 반사율은 약 4%정도이며 이는 광섬유

의 굴절율 1.5과 공기의 굴절율 1을 대입해 계산한 결과와 거의 일치됨을 알 수 있다. 이와 같이 광섬유고리안에 편광기를 돔으로써 공극사이에서 다중반사되어 최대의 간섭을 일으킴으로써 1nm의 간격으로 발진을 얻어낼 수 있다.

그림 3.의 셋업에서 SOA의 주입전류를 100 mA, 루프 내의 감쇠기를 -5 dB로 하고 편광제어기의 두 λ plate의 광축을 대략적으로 일치시켰을 경우 optical spectrum analyzer를 사용하여 측정된 발진 출력의 스펙트럼의 모습은 그림 8.과 같고 편광기를 돌림에 따라 발진파장이 (a)1550 nm에서 (b)1560 nm의 장파장으로 이동하다가 1540 nm 및 1560 nm에서 동시 발진하면서 (c)1560 nm에서는 발진이 사라지고 1540 nm만 남고 다시 (d)1550 nm로 발진파장이 이동하는 양상을 띤다. 여기서 특기할 점은 앞서의 편광제어기를 조절할 때 보여지는 양상처럼 편광각이 90° 마다 주기적으로 발진파장이 반복된다는 것과 單峰(그림 8. (a),(d)) 및 雙峰(그림 8.(b),(c))이 나타난다는 점이다. 또한 다수의 파장들이 내부공진편광기로 인해 발진파장의 간격이 약 1 nm의 종모드 간격을 가지고 발진함을 볼 수 있다. 발진광출력은 SOA의 출력측에 10%의 tap으로부터 나오는데 약 300~400 μ W (-5~-4 dBm) 정도로 측정되었다. 이는 100 mA의 주입전류에 대해서 1550 nm 주변의 파장대에서 SOA의 포화광출력이 6dBm이고 10%의 tap으로부터 10 dB의 파워저하를 고려하면 대충 맞는다는 것을 알 수 있다.

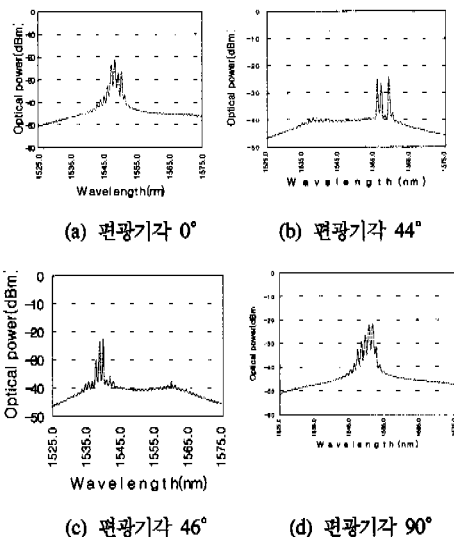


그림 8. 내부공진편광각에 따른 발진파장의 이동

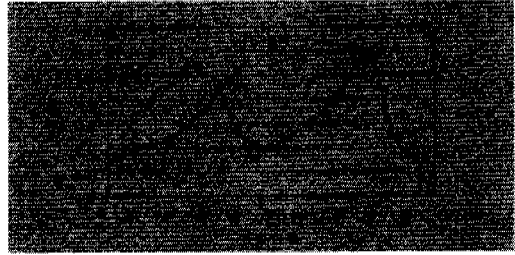


그림 9. 내부공진편광각에 따른 발진출력의 편광특성

또한 그림 3.의 편광분석 셋업을 사용하여 발진광파의 편광특성을 살펴보았다. 0° ~ 180° 로 회전된 편광기의 각도에 따라서 발진출력의 편광특성은 그림 9.에서와 같이 편광각이 0°, 90° 에서 편광도가 최저로 나타나는데 이는 각각 SOA의 TE 성분 및 TM 성분 만을 편광기가 통과시켰을 때 지속적으로 그 성분 만이 발진되는 것으로 추정된다. 이는 여기광파 TE 및 TM이 각각 귀환광파 TE' 및 TM' 으로서 다른 광축에 커플링되지 않고 자신의 광축으로만 커플링되어 발진됨을 입증해 준다. 또한 편광각 60°, 150° 에서 편광도가 최대로 되는데 TE 및 TM 성분들이 편광기를 통과함으로써 두 성분이 동시에 발진되는 경우로 해석할 수 있다. 이러한 발진파장대역의 변화 및 편광특성은 다음과 같이 설명할 수 있다.

그림 10.과 같이 내부공진편광기와 입출력측에 연결된 광섬유고리의 복굴절특성을 포함하는 모델링을 사용하여 표 2.와 같은 TE 및 TM 모드 각각의 경우에 대해서 광섬유1과 광섬유2 및 SOA에 의해 형성되는 8개의 광경로에 따른 복굴절손실 특성을 얻을 수 있다. 여기서 ϕ 및 ϕ' , ϕ 는 고정값이고 $\phi = \phi' - \phi$ 이다. ϕ 는 내부공진편광기의 회전각이 된다. 그림 3.의 셋업에서 내부공진편광기를 돌림에 따라 두 개의 광섬유고리 1,2에 의해 형성된 8가지의 광경로에 대한 복굴절 손실을 알아보기 위해 주어진 ϕ 및 ϕ' , ϕ 에 대해 ϕ 의 변화에 따른 각 광경로의 복굴절손실은 그림 11.과 같고 이 경우가 가장 많이 나타날 수 있는 발진형태이다.

그림 11.에서 ϕ 이 0° 에서는 TE 모드가 하나의 광경로0(TE_0)에 대해서만 복굴절손실이 작아 이 광경로에서 발진이 일어날 수 있다. ϕ 이 45° 에서는 TE 및 TM 모드가 각각 두 개의 광경로0,1(TE_{01}) 및 광경로6,7(TM_{67})에 대해서 복굴절손실이 같아 동시에 두 개의 광경로에서 발진이 일어날 가능성이 많다. ϕ 이 90° 에서는 TM 모드가 광경로

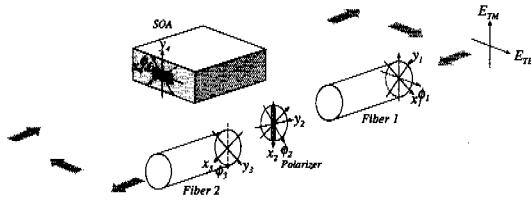


그림 10. 내부공진편광기에 대한 광경로 모델

7(TM₇)에 대해서만 복굴절손실이 작아 이 광경로에서 발진이 일어나는데 ϕ 이 0° 인 경우와 비교할 때 광경로가 다름을 주시해 볼 필요가 있다. ϕ 이 135° 에서는 TE 및 TM 모드가 각각 두 개의 광경로 0,1(TE₀₁) 및 광경로6,7(TM₆₇)에 대해서 복굴절손실이 같아 동시에 두 개의 광경로에서 발진이 일어날 가능성이 많은데 ϕ 이 45° 인 경우와 비교할 때 같음을 알 수 있다. 또한 $\phi=0^\circ$ 및 90° 일 때 각각 TE 및 TM 모드만이 발진이 일어나 편광도가 최소이고 $\phi=45^\circ$ 및 135° 일 때 TE 및 TM 모드가 동시에 발진이 일어나 편광도가 최대가 된다.

표 2. 내부공진편광기로 구성된 광섬유고리의 광경로에 따른 복굴절손실

광경로 k	광축	복굴절 손실		특기사항
		TE 입력 B_k^{TE}	TM 입력 B_k^{TM}	
0	$x_4x_3x_2x_1$	$c_4c_3c_2c_1$	—	B_k^{TE} : TE입력/TE출력
1	$x_4x_3x_2y_1$	$c_4c_3(-s_2)s_1$	—	
2	$x_4y_3x_2x_1$	$(-s_4)s_3c_2c_1$	—	
3	$x_4y_3x_2y_1$	$(-s_4)s_3(-s_2)s_1$	—	B_k^{TM} : TM입력/TM출력
4	$y_4x_3x_2x_1$	—	$s_4c_3c_2(-s_1)$	
5	$y_4x_3x_2y_1$	—	$s_4c_3(-s_2)c_1$	
6	$y_4y_3x_2x_1$	—	$c_4s_3c_2(-s_1)$	
7	$y_4y_3x_2y_1$	—	$c_4s_3(-s_2)c_1$	

그림 8.의 출력 스펙트럼은 90° 주기로 거의 같은 모습을 띠고 있고 한 번은 單峰을 보여 주고 다음 한 번은 雙峰의 형상을 보여 주는데 앞서의 분석과 연관시켜 설명하면 그림 8.(a) 및 (d)는 편광도가 최소이고 각각 TE 및 TM 모드만이 나타남을 그림 9.의 편광도 측정결과로부터 알 수 있다. 이는 그림 11.에서 $\phi=0^\circ$ 및 90° 에 해당되는데 이 경우 TE 및 TM 모드가 서로 다른 광경로0,7(TE₀, TM₇)에서 발진이 일어남에도 불구하고 발진파장대역이 거의 같음을 그림 8.(a),(d)에서 볼 수 있다. 이는 앞서

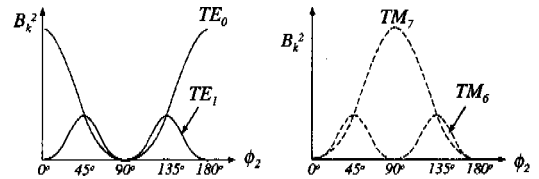


그림 11. 내부공진편광기를 돌림에 따른 광경로의 대표적 인 복굴절손실 특성

편광제어기의 경우에서의 분석이 맞음을 입증해 준다.

ϕ 이 45° 및 135° 에서도 마찬가지로 편광제어기의 경우와 유사한 양상을 가진다. ϕ 이 0° 및 90° 에서와 같이 광경로에 따른 발진파장의 변화가 미미하다고 하면 TE₀₁ 및 TM₆₇의 경우 역시 각각 발진파장이 거의 같아서 單峰을 형성해야 하겠지만 실제로 그림 8.(b), (c)의 출력 스펙트럼의 결과는 雙峰을 형성하는 것으로 볼 때 TE 및 TM 모드는 각각 광경로0,1 및 광경로6,7 상에 위상정합을 만족하는 같은 파장들간에 간섭성이 있다는 사실을 추정해 볼 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 논문에서는 편광제어를 이용하여 발진파장을 가변시키는 고리형 광섬유레이저의 동작 원리를 단순화된 모델링을 통해서 분석하고 이러한 분석과 실험결과를 대비하여 실험 결과에 대한 타당한 이해를 할 수 있었다. 먼저 개념적으로 복굴절소자의 광축들이 형성하는 광경로를 정의하고 이러한 광경로들에 대한 복굴절손실을 정의함으로써 복굴절손실이 작은 광경로 상에서 위상정합조건을 만족하는 발진가능한 파장들을 고려하였다.

일차적으로 편광제어기만을 광섬유고리안에 두었을 경우에 대해 편광제어기를 조절함에 따라 출력 스펙트럼의 변화를 관찰했을 때 90° 주기로 거의 같은 형태로 나타나고 또한 單峰 및 雙峰의 형태로 나타남을 볼 수 있었다. 또한 내부공진편광기를 돌림에 따라 출력 스펙트럼의 변화 역시 편광제어기의 조절에 따른 출력 스펙트럼의 변화와 거의 같은 양상을 띠고 있음을 관찰할 수 있었다. 모델링을 통한 분석으로부터 편광각이 0° 및 90° 에서는 각각 단일 TE 및 TM모드만이 나타나 편광도는 가장 작고 복굴절손실이 가장 작은 광경로가 하나만이 존재함으로써 발진파장대역은 같은 형태의 單峰을 형성함을 알 수 있다. 45° 및 135° 에서는 TE, TM

