

복굴절이 있는 광아이솔레이터의 동작 특성 분석

正會員 조 상 연*, 강 현 서*, 이 경 식**

Analysis of the Operating Characteristics of a Birefringent Optical Isolator

Sang Yeon Cho*, Hyun Seo Kang*, Kyung Shik Lee** *Regular Members*

요 약

광아이솔레이터의 파라데이 회전자 재질 내에 존재하는 복굴절이 아이솔레이션 동작과 투과 손실에 미치는 영향에 대해서 해석해 보았다. 복굴절이 존재하는 광아이솔레이터의 경우 50dB의 아이솔레이션을 유지하기 위해 입출력 편광자 사이의 투과각과 파라데이 회전자 회전각의 허용 범위가 복굴절이 없는 아이솔레이터의 경우에는 $\pm 0.18^\circ$ 인데 비해 복굴절(위상지연이 0.5°)이 있는 경우에는 $\pm 0.09^\circ$ 로 50%정도 줄어들게 됨을 알 수 있었다. 또한 복굴절이 있는 아이솔레이터의 파장 의존 특성에 대하여도 시뮬레이션 해 보았다. 또한 복굴절의 크기가 작은 경우 투과 손실에는 영향을 거의 미치지 않지만 아이솔레이션에는 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The effect of the birefringence existing in the Faraday rotator on the isolation and transmission properties of the isolator was investigated. To maintain isolation of 50dB, both the deviation of the transmission angle between input and output polarizers and the deviation of the Faraday rotation angle are permitted to $\pm 0.18^\circ$ for birefringenceless isolator and to $\pm 0.09^\circ$ for birefringent isolator. This means that the isolator possessing linear birefringence of 0.5° requires 50% more accurate adjustment than that of no birefringence. We also simulated the characteristics of wavelength dependence for both the birefringent isolator and the birefringenceless isolator. It is also found that forward transmission loss doesn't vary much with small birefringence.

I. 서 론

광통신 시스템에서 전송 선로 내부의 물리적인 결합 및 레이저에서 광섬유 내로 빔의 결합시 multiple reflection에 의해서 빔이 레이저 안으로 다시 들어가게 된다[1]. 이때 반사되어 레이저 안으로 들어온 빔에 의해서 레이저 안에서 기생 발진(parasitic oscillation)

*성균관대학교 대학원 전자공학과
**성균관대학교 전기전자컴퓨터 공학부 부교수
論文番號:96121-0416
接受日字:1996年 4月 16日

이 야기되어 레이저 빔의 주파수와 출력의 세기가 불안정하게 된다. 그런데 코히어런트 광통신 및 고속 통신을 하기 위해서 레이저 내의 주파수 안정화는 필수 요인이라고 하겠다. 따라서 컨넥터나 스플라이스에서 야기되는 반사광을 효율적으로 제거함으로써 광통신 시스템의 성능을 높여 주기 위해서 송신단에 광아이솔레이터를 사용하고 있다. 이렇듯 광아이솔레이터는 레이저의 성능을 크게 높여 줄뿐만 아니라 장거리 통신 시스템이나 광섬유 증폭기의 성능을 크게 높여 줄 수 있다. 이밖에도 광측정시스템에 적용되는 경우 광섬유 케이블이나 광 스위치 등의 광소자의 안정성을 측정하기 위한 광손실 측정 등의 높은 정확도가 요구되어지는 곳에 사용되고 있다[2]. 광아이솔레이터에 관한 기존의 연구 과정을 살펴보면, 뛰어난 아이솔레이션 특성을 얻기 위해 광섬유를 이용한 coil형의 아이솔레이터뿐만 아니라 유리 또는 결정처럼 비대상수 값이 큰 자기광학재질을 이용한 bulk형의 아이솔레이터에 관한 여러 연구가 진행되어 왔다[2][3]. 이러한 bulk형의 아이솔레이터의 경우에 지금까지의 연구는 주로 좋은 아이솔레이션 특성을 얻기 위해 재질의 특성에 중점을 두어 재질의 온도 특성 및 파장 의존 특성에 관심을 기울여 왔다[4]. 그러나 일반적으로 파라데이 재질로 사용하는 유리나 결정에는 흔히 1° 정도의 복굴절[5]이 있으며 coil형 광섬유로 된 coil형의 아이솔레이터에는 광섬유의 자체 또는 구부림으로 더욱더 큰 복굴절[6][7]이 존재한다. 지금까지 여러 연구가들에 의한 광아이솔레이터에 대한 해석은 복굴절이 광아이솔레이터에 존재하지 않는다고 가정하였으나 실제로 영향을 미칠 정도로 복굴절이 존재할 수 있기 때문에 복굴절이 광아이솔레이터의 성능에 어떻게 영향을 미치는지를 분석해보아야 하겠다. 따라서 본 논문에서는 광아이솔레이터의 파라데이 회전자 재질 내부의 복굴절이 아이솔레이션 동작과 투과손실에 어떻게 영향을 미치는지를 해석해 보았다. II장에서는 파라데이 회전자 재질 내에서의 복굴절이 아이솔레이션에 미치는 영향에 대해서 아이솔레이터 구성 소자들 즉, 파라데이 회전자의 회전각 및 출력 편광자의 각을 고려하여 시뮬레이션 해 보았다. III장에서는 복굴절이 아이솔레이터의 투과손실(forward transmission loss)에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 마지막으로 IV장에서는 복굴

절이 존재하는 광아이솔레이터의 파장 의존 특성을 복굴절이 없는 경우와 존재하는 경우를 서로 비교하여 시뮬레이션 해 보았다.

II. 재질의 복굴절이 아이솔레이션에 미치는 영향

그림 1에 나타나 있듯이 광아이솔레이터를 구성하는 소자들은 입력 및 출력 편광자와 파라데이 재질로 구성된다. 이상적인 아이솔레이터는 투과손실은 없고 반사되어 되돌아오는 빔의 아이솔레이션은 무한대의 값을 가져야 하는데, 이것은 빔의 편광상태가 선형 편광으로 계속 유지되는 경우에만 적용된다. 그런데 파라데이 재질 내에 선형 복굴절이 존재하게 되면 빔이 광아이솔레이터를 통과할 때 빔의 편광상태가 변하게 되어 이상적인 동작을 하지 못하게 된다. 따라서 아이솔레이터에 대한 연구에서 이러한 복굴절에 의한 영향은 반드시 고려되어야 한다.

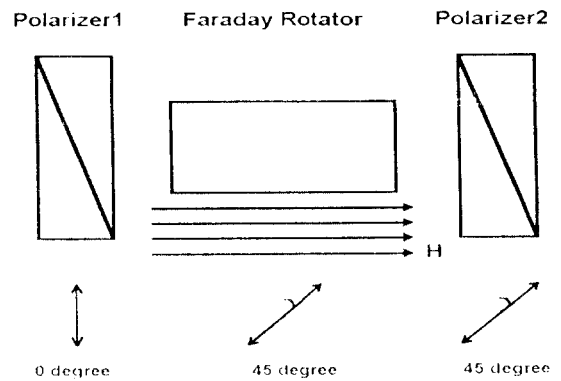


Fig. 1 Schematic representation of optical isolator.

만일 입력빔($E_x(0), E_y(0)$)이 입력 편광자 Pol 1, 파라데이 회전자 FR 과 출력 편광자 Pol 2를 거쳐서 아이솔레이터를 통과한 뒤 같은 경로를 통해서 다시 반사되어 나올 때, 출력빔($E_x(z), E_y(z)$)은 Jones calculus에 의해서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{bmatrix} = [\text{Pol 1}] \cdot [\text{FR}] \cdot [\text{Pol 2}] \cdot [\text{Pol 2}] \cdot [\text{FR}]$$

$$\cdot [\text{Pol } 1] \cdot \begin{bmatrix} E_x(0) \\ E_y(z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 복굴절이 있는 파라데이 회전자의 Jones matrix는

$$[\text{FR}] = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\varphi}{2}) - i \cos \chi \sin(\frac{\varphi}{2}) & -\sin \chi \sin(\frac{\varphi}{2}) \\ \sin \chi \sin(\frac{\varphi}{2}) & \cos(\frac{\varphi}{2}) + i \cos \chi \sin(\frac{\varphi}{2}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

와 같고 $\tan \chi = 2\theta_F/\rho$, $\varphi = \sqrt{(2\theta_F)^2 + \rho^2}$ 이다. φ 는 전체 복굴절 양이고, ρ 는 선형 복굴절이고 θ_F 는 파라데이 회전각이다. 식(2)는 입사 빔의 기준 좌표축과 재질의 축이 서로 평행하다고 가정하였다. 만일, Pol 2의 축과 Pol 1의 축이 θ_2 의 각을 이루고 있고 파라데이 회전각을 θ_F 라고 가정할 때의 광아이솔레이션(I)은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$I = 10 \log \left(\frac{4}{\{\cos \varphi + [1 - 2\cos^2 \chi \sin^2(\frac{\varphi}{2})] \cos 2\theta_2\}^2 + \{[1 + \cos 2\theta_2] \cos \chi \sin \varphi\}^2} \right) \quad [\text{dB}]. \quad (3)$$

위 식을 통해서 광아이솔레이터에 존재하는 복굴절이 아이솔레이션 동작을 제한시키는 것을 알 수 있다. 그림 2는 복굴절의 크기를 설명해 줄 수 있는 복굴절에 의한 위상지연과 아이솔레이션 사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 위상지연 0.57°에 해당되는 복굴절이 있는 경우 아이솔레이션은 최대 50dB로 제한되어짐을 알 수 있다.

이상적인 광아이솔레이터에서는 Pol 2의 축과 Pol 1의 축이 45°각을 이루고 있고 파라데이 회전각이 45°를 이루고 있을 때이다. 그러나 만일 Pol 2와 Pol 1사이의 각과 파라데이 회전각이 각각 45°를 이루지 못하고 $\Delta\theta_2$ (입출력 편광자 사이의 변화량; $45^\circ \pm \Delta\theta_2$) 또는 $\Delta\theta_F$ (파라데이 회전각의 변화량; $45^\circ \pm \Delta\theta_F$)만큼 변화가 생기게 되면 이로 인해 아이솔레이션 동작에 영향을 미치게 된다. 그림 3은 아이솔레이터 구성 소자들에서 생긴 각의 변화($\Delta\theta_2$ 또는 $\Delta\theta_F$)가 아이솔레이

션에 미치는 영향을 식 (3)을 이용하여 나타낸 것이다. 그런데 그림 3을 통해 확인할 수 있었던 것은 회전각에서의 변화량($\Delta\theta_F$)과 입출력 편광자 사이에 이루는 각에서의 변화량($\Delta\theta_2$)이 아이솔레이션에 미치는 영향은 동일하다는 것이다. 그 이유는 복굴절을 고려하지 않은 경우, 광아이솔레이터의 아이솔레이션 동작을 살펴보면, 아이솔레이션 동작에 영향을 주는 요인은 회전자의 회전각과 입출력 편광자 사이에 이루는 각이다. 이때 두각이 모두 45°인 경우 반사되어 입력 편광자로 되돌아온 반사빔이 입력 편광자의 투과각과 서로 90°를 이루고 있으므로 100% 아이솔레이션을 시키는데 반해서 만일 입출력 편광자 사이의 각이

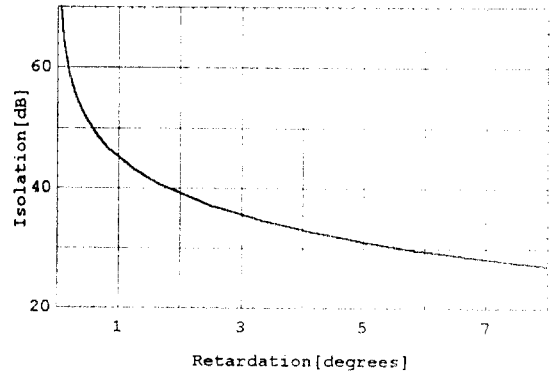


Fig. 2 Degradation of isolation due to the phase retardation (or linear birefringence).

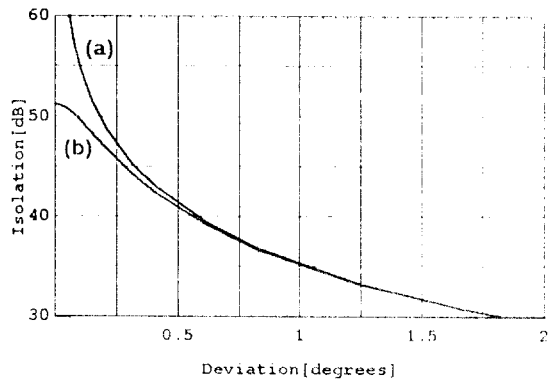


Fig. 3 Degradation of isolation as a function of deviation angles $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_F$ for birefringent and birefringenceless isolator((a) $\rho = 0^\circ$, (b) $\rho = 0.5^\circ$).

나 파라데이 회전자의 회전각의 변화량이 $45^\circ \pm \Delta\theta_{F,2}$ 가 되면, 두 가지 경우 모두 반사되어 입력 편광자로 되돌아온 반사빔이 입력 편광자의 투과각과 서로 $90^\circ \pm \Delta\theta_{F,2}$ 를 이루게 되어 아이솔레이터의 아이솔레이션 값이 무한대가 되지 않고 낮아지게 된다. 따라서 회전자에서의 변화량과 입출력 편광자가 이루는 각에서의 변화량은 아이솔레이션에 동일한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 그림 3을 살펴보면 복굴절이 없는 경우 50dB의 아이솔레이션을 유지하기 위해서 회전자와 편광자의 허용 변화량의 범위는 0.18° 인데 비해서 아이솔레이터를 지나는 빔의 두 성분(E_x , E_y)이 복굴절에 의해 0.5° 의 위상지연이 생긴 경우에는 허용 변화량의 범위가 0.09° 로 허용 범위가 50%정도 줄어들게 됨을 알 수 있다.

III. 복굴절이 투과손실에 미치는 영향

광아이솔레이터의 회전자로 쓰이는 파라데이 회전자 재질 내에 일반적으로 복굴절이 존재하므로 아이솔레이터를 통과하는 빔의 편광상태가 선형 편광을 유지하지 못하므로 아이솔레이터 구성 소자들이 이상적인 동작을 한다고 해도 불가피하게 투과손실이 생기게 된다.

입력빔($E_x(0)$, $E_y(0)$)이 입력 편광자 Pol 1, 파라데이 회전자 FR과 출력 편광자 Pol 2를 거쳐서 아이솔레이터를 통과한 후에 아이솔레이터를 나오는 출력빔($E_x(z)$, $E_y(z)$)은 Jones calculus에 의해서 아래와 같이 표시되어 진다.

$$\begin{bmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{bmatrix} = [\text{Pol 2}] \cdot [\text{FR}] \cdot [\text{Pol 1}] \cdot \begin{bmatrix} E_x(0) \\ E_y(0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

파라데이 회전자의 회전각 θ_F 와 Pol 2의 축과 Pol 1의 축이 θ_2 의 각을 이루고 전체 복굴절 양을 φ 라고 가정했을 때의 투과손실(L)은 다음과 같다.

$$L = 10 \log \left[\frac{1}{\cos^2 \frac{\varphi}{2} \cos 2\theta_2 + \sin^2 \theta_2 + \frac{1}{2} \sin \chi \sin 2\theta_2 \sin \varphi + \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_2 + \cos^2 \chi \sin^2 \frac{\varphi}{2} \cos 2\theta_2} \right] \quad (5)$$

[dB].

식(5)를 이용하여 아이솔레이터 내부의 복굴절에 따른 아이솔레이터의 투과손실을 나타내어 보면 그림 4와 같다. 만일 아이솔레이터 재질에 존재하는 복굴절에 의해 아이솔레이터를 통과하는 빔의 두 성분(E_x , E_y)사이의 위상지연이 2° 라고 가정했을 때 복굴절에 의해서 야기되는 아이솔레이터의 투과손실은 입력에 대해 0.12%정도의 감소로 변화량은 아주 작은 값이다. 따라서 복굴절의 크기가 작을 경우 복굴절이 아이솔레이터의 투과손실에 미치는 영향은 매우 작다는 것을 알 수 있다.

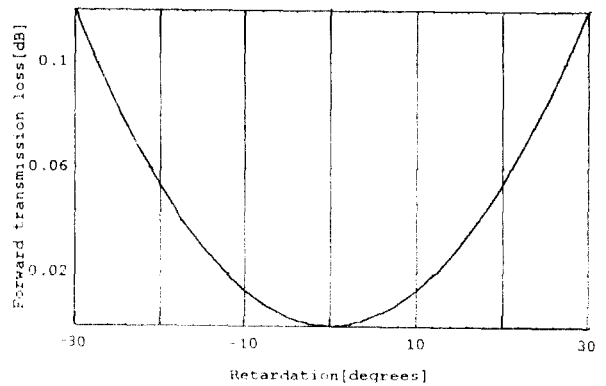


Fig. 4 The variation of forward transmission loss due to the phase retardation.

또한 복굴절에 의한 영향뿐만 아니라 아이솔레이터 구성 소자들이 이상적인 동작을 하지 못하고 투과각(θ_2)이나 회전각(θ_F)에 $\Delta\theta_{2,F}$ 만큼의 변화량이 생기므로써 두 각이 서로 일치하지 못하게 되어 아이솔레이터를 통과하는 빔에 손실이 발생하게 된다. 따라서 파라데이 회전자의 회전각과 출력 편광자의 투과각에 각각 $\Delta\theta_F$ 와 $\Delta\theta_2$ 만큼의 변화량이 생겼을 때 아이솔레이터의 투과손실에 미치는 영향은 서로 동일하다. 그림 5는 파라데이 회전자 재질에 복굴절이 없는 경우와 복굴절에 의해 야기되는 위상지연이 1° 인 경우 회전자와 편광자의 변화량이 투과손실에 미치는 영향에 대해서 나타낸 것이다. 위상지연 1° 에 해당하는 복굴절이 있는 아이솔레이터의 경우와 복굴절이 없는 아이솔레이터의 경우에 아이솔레이터의 투과손실을 0.1dB이하로 유지하기 위해서 아이솔레이터를 구성하는 각 소자들(출력 편광자 및 파라데이 회전자)의

허용 변화각의 범위는 복굴절이 있는 경우는 $\pm 8.65^\circ$ 인데 비해서 복굴절이 없는 아이솔레이터의 경우는 $\pm 8.67^\circ$ 로 복굴절에 의해 허용 변화 범위가 0.2%정도 감소되어 아주 작은 변화가 있음을 알 수 있다.

복굴절이 아이솔레이터의 동작에 미치는 영향은 그림 2와 그림 4를 비교해 보면 쉽게 알 수 있듯이, 위상지연이 2° 정도 있는 경우 투과손실은 입력에 대해 0.12%정도의 아주 작은 손실이 있는데 비해 상대적으로 아이솔레이션은 38dB정도로 위상지연에 의해 현저히 줄어들게 됨을 알 수 있다. 따라서 아이솔레이터의 복굴절 현상은 복굴절의 크기가 작은 경우 투과손실에는 거의 영향을 미치지 않으나 아이솔레이션에는 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

IV. 광아이솔레이터의 파장 의존 특성

파라데이 회전자로 쓰이는 재료의 비대상수의 파장 의존 특성 때문에 광원으로 쓰이는 레이저의 중심 파장이 이동되면 이에 의해서 아이솔레이터의 동작에 영향을 주게 된다. 먼저 아이솔레이터의 파장 의존 특성을 설명하기 위해 광아이솔레이터에서 가장 중요한 파라데이 효과에 의해서 비대상수 값이 V 인 재질을 L 만큼 진행할 때, 선형편광빔의 편광면이 $\theta_F (= V \cdot B \cdot L)$ 만큼 회전하게 된다.

여기서 B 는 빔의 진행방향과 나란한 방향의 재질에서의 균일한 자속밀도이다. 그런데 일반적으로 비대상수는 다음과 같은 파장 의존 특성을 갖고 있다[8].

$$V = \frac{A}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (6)$$

본 논문에서 시뮬레이션 하기 위해 사용한 파라데이 회전자의 재료는 Terbium Aluminosilicate($A = -19.7 \times 10^6[(nm)^2 \times rad/(T m)]$)이고 $\lambda_0 = 385nm$ 이다. 중심 파장(λ_1)은 830nm로 가정했다.

(1) 아이솔레이션의 파장 의존 특성

파라데이 회전자 재질 내부에 복굴절이 있는 광아이솔레이터의 파장 의존 특성은 식(2)와 식(6)을 이용해서 구할 수 있다. 광원의 동작 파장의 변화는 재질의 비대상수의 파장 의존 특성에 의해서 파라데이 회전자의 회전각에 영향을 미치게 되고, 이러한 원인에

의해서 아이솔레이션 값에 영향을 주게 된다. 그림 6에서는 레이저의 동작 파장이 중심 파장에서 벗어남에 따라 복굴절이 없는 경우와 복굴절에 의해서 야기되는 통과빔의 두성분 사이의 위상지연이 0.5° 인 경우 아이솔레이션이 어떻게 변화되는지를 나타낸 것이다. 그림 6은 중심 파장을 830nm로 가정하고 동작 파장이 중심 파장에서 벗어남에 따라 재질 내에 복굴절이 존재하는 경우와 복굴절이 없는 경우의 아이솔레이션 동작의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 6에 나타나 있듯이 50dB의 아이솔레이션을 유지하기 위해서 복굴절(위상지연이 0.5°)이 있는 경우에는 중심 파장에서 $\pm 0.62nm$ 만큼의 동작 파장의 이동을 허용하는데 비해 복굴절이 없는 경우의 동작 파장의 이동 허용 범위는 $\pm 1.32nm$ 이다. 따라서 복굴절이 있는 경우가 복굴절이 존재하지 않는 경우에 비해서 허용되는 동작 파장 영역이 53%정도 감소가 되는 것을 알 수 있다.

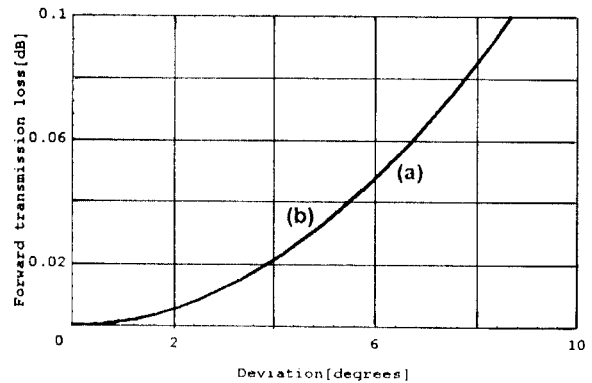


Fig. 5 Calculated forward transmission loss as a function of deviation angles $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_F$ for birefringent and birefringenceless isolator(a) $\rho = 0^\circ$, (b) $\rho = 1^\circ$.

(2) 투과손실의 파장 의존 특성

아이솔레이터의 파장 의존 특성에 의해서 입력빔의 파장에 따라 파라데이 회전자에서 빔의 회전각이 변화하게 되는데, 이때 파라데이 회전자를 통과한 빔의 편광면이 입력 편광자의 투과각과 45° 를 이루지 못하고 변화된 회전각만큼 출력 편광자에서 투과하지 못하게 된다. 이로 인해 아이솔레이터를 통과하는 빔에 손실이 일어나게 된다. 그림 7의 경우는 복굴절

에 의해 아이솔레이터를 통과 빔의 두 성분(E_x , E_y)사이의 위상지연이 1° 인 경우와 복굴절이 없는 경우에 레이저의 동작 파장이 중심 파장에서 벗어남에 따라 아이솔레이터 투과손실의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 복굴절(위상지연이 1°)이 있는 경우에는 0.1dB이하의 투과손실을 유지하기 위해 중심 파장에서 이동 허용 범위는 74.43nm인데 비해 복굴절이 존재하지 않는 경우의 허용 범위는 74.46nm이다. 그림 6과 7을 비교해 보면, 아이솔레이터에 동일한 위상지연(1°)을 가졌을 경우 재질 내의 복굴절 현상이 투과손실보다는 아이솔레이션에 더 많은 영향을 주게 된다는 것을 알 수 있다.

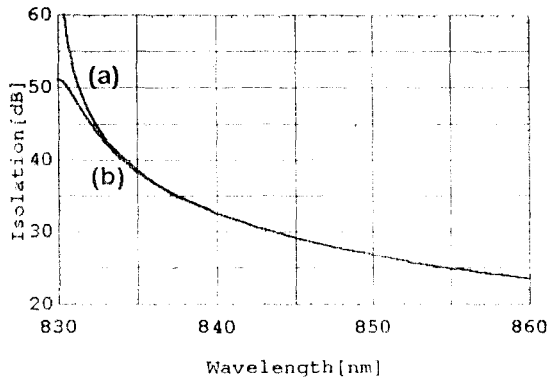


Fig. 6 Degradation of isolation with shifting from the operating wavelength for birefringent and birefringenceless isolator($\lambda_1 = 830\text{nm}$)(a) $\rho = 0^\circ$, (b) $\rho = 0.5^\circ$)

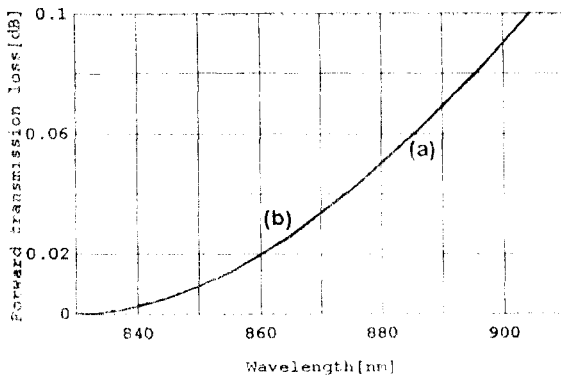


Fig. 7 The variation of the forward transmission loss with shifting from the operating wavelength for birefringent and birefringenceless isolator($\lambda_1 = 830\text{nm}$)(a) $\rho = 0^\circ$, (b) $\rho = 1^\circ$)

V. 결론

본 논문에서는 복굴절이 있는 광아이솔레이터의 아이솔레이션 동작과 투과손실에 대해서 시뮬레이션 해 보았다. 시뮬레이션 결과 복굴절이 존재하는 광아이솔레이터의 경우 50dB의 아이솔레이션을 유지하기 위해 입출력 편광자 사이의 투과각과 파라데이 회전자 회전각의 오차 허용 범위가 복굴절이 없는 아이솔레이터의 경우에는 $\pm 0.18^\circ$ 인데 비해 복굴절(위상지연이 0.5°)이 있는 경우에는 $\pm 0.09^\circ$ 로 50%정도 줄어들게 됨을 알 수 있었다. 이에 비해 투과손실의 경우에는 0.1dB이하의 손실을 유지하기 위해서는 소자들의 허용 범위가 복굴절(위상지연이 1°)이 있는 경우에는 $\pm 8.65^\circ$ 이고 복굴절이 없는 경우에는 $\pm 8.67^\circ$ 로 복굴절에 의한 영향 때문에 0.2%정도의 변화가 있음을 알 수 있었다. 따라서 복굴절이 아이솔레이션에 미치는 영향과 비교해 보았을 때, 복굴절이 투과손실에 미치는 영향이 그리 크지 않음을 알 수 있었다. 또한 광아이솔레이터의 파장 의존 특성에 대해 시뮬레이션 해 보았는데, 50dB의 아이솔레이션을 유지하기 위해서 복굴절(위상지연이 0.5°)이 있는 경우에는 동작 파장의 이동 허용 범위는 $\pm 0.62\text{nm}$ 인데 비해 복굴절이 없는 경우의 이동 허용 범위는 $\pm 1.32\text{nm}$ 였다.

참고 문헌

1. R. M. Jopson, G. Eisenstein, H. E. Earl, K. L. Hall, "Bulk optical isolator Tunable from $1.2\mu\text{m}$ to $1.7\mu\text{m}$ " Electronics Letters, Vol. 21, No. 18, pp. 783-784, 1985.
2. Shigetaka Matsumoto and Shizuo Suzuki, "Temperature-stable Faraday rotator material and its use in high-performance optical isolator," Applied Optics, Vol. 25, No. 12, pp. 1940-1945, 1986.
3. G. W. Day, David N. Payne, Arthur J. Barlow, and Jens J. Ramskov-Hansen, "Design and Performance of Tuned Fiber Coil Isolators," Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-2, No. 1, pp. 56-60, 1984.
4. Jeffrey A. Davis and Robert M. Bunch, "Temperature dependence of the Faraday rotator of Hoya

- FR-5 glass," Applied Optics, Vol. 23, No. 4, pp. 633-639, 1984.
5. Kyung Shik Lee, "Electrooptic voltage sensor: birefringence effects and compensation methods," Applied Optics, Vol. 29, No. 3, pp. 4453-4461, 1990.
 6. R. Ulrich, S. C. Rashleigh, and W. Eickhoff, "Bending-induced birefringence in single-mode fibers," Optics Letters, Vol. 5, No. 6, pp. 273-275, 1980.
 7. W. J. Tabor, A. W. Anderson, and L. G. Van Uitert, "Visible and Infrared Faraday Rotator and Birefringence of Single-Crystal Rare-Earth Orthoferrites," Journal of Applied Physics, Vol. 41, No. 7, pp. 3018-3021, 1970.
 8. John Ballato and Elias Snitzer, "Fabrication of fibers with high rare-earth concentrations for Faraday isolator applications," Applied Optics, Vol. 34, pp. 6848-6854, 1995.



조 상 연(Sang Yeon Cho) 정회원
 1973年 11月 27日生
 1996年 2月: 성균관대학교 전자공학과 졸업
 1996年 3月~現在: 성균관대학교 대학원 전기전자컴퓨터 공학부 석사과정 재학중



강 현 서(Hyun Seo Kang) 정회원
 1968年 7月 16日生
 1994年 2月: 성균관대학교 전자공학과 졸업
 1996年 2月: 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1996年 3月~現在: 성균관대학교 대학원 전기전자컴퓨터 공학부 박사과정 재학중



이 경 식(Kyung Shik Lee) 정회원
 1979年: 성균관대학교 전자공학과 졸업
 1978年~1980年: 한국통신기술연구소(현 ETRI) 광통신연구실 근무
 1982年: University of Colorado 전기전자공학석사

1985年: University of Colorado 연구교원
 1986年~1988年: 미국립표준연구소(NIST)
 1988年~1990年: 미 TACAN Corp. 근무
 1990年~1994年: 성균관대학교 전자공학과 조교수
 1994年~現在: 성균관대학교 전기전자컴퓨터 공학부 교수