

# 순방향 마이크로초 단위의 실시간 편광상태 검출 시스템

준회원 정 현 수\*, 종신회원 신 서 용\*

## A Feed-forward Microsecond Level Real-time SOP Finding System

Hyunsoo Jung\* Associate Member, Seoyong Shin\* Lifelong Member

### 요 약

본 논문에서는 실시간으로 빛의 편광상태(SOP)를 파악할 수 있는 장치를 소개한다. 소개하는 장치는 광파를 수평 선형편광과 수직 선형편광 성분으로 분리하고, 각각을 기준 광원의 수평 선형편광 및 수직 선형편광 성분들과 중첩시키고 이로부터 발생한 비트신호들을 시간 영역에서 측정하여 비교함으로써 광파의 SOP를 파악해 내는 순방향(feed-forward) 측정 시스템으로서 귀환(feedback) 방식을 이용하는 기존의 방식들에 비해 SOP 측정시간을 실시간으로 단축시키는 장점을 갖고 있다. 본 논문에서는 또한 SOP 측정 과정에서 수반될 수 있는 광소자의 복굴절 변화에 의한 측정 오차를 매우 간편하고 정확하게 제거할 수 있는 새로운 오차 보정 방식을 소개한다. 제안하는 시스템의 동작과 성능을 모의실험 및 광학 실험을 통해 입증하였다.

**Key Words:** State of polarization, Stokes parameter, Jones vector, Polarization mode dispersion

### ABSTRACT

In this paper, we introduce a real-time state-of-polarization (SOP) finding system. The system divides the optical wave into linear horizontal- and vertical-SOP components and measures two different beat-signals, which are produced by superposition with reference optical source, in time domain. From these measured beat signals we can get SOP information of the signal instantly. Since the proposed scheme is a feed-forward measurement system, comparing with conventional systems which require an optical feedback loop, the measurement time becomes reduced tremendously. We also introduced a novel calibration method for compensating birefringence-related errors which may occur during the measurement. We prove the operation and performance of the proposed system through computer simulation and actual experiments.

### I. 서 론

광신호의 편광상태(SOP: State Of Polarization) 측정은 광부품의 특성 평가나 광통신 시스템의 성능 향상에 있어서 중요한 요인 중의 하나이다. 한 예로서, 수신광신호의 SOP를 적절히 변화 시켜 편광유지광섬유(PMF: Polarization Maintaining Fiber)를 통과하도록 하여 편광모드분산(PMD: Polarization Mode Dispersion)을 보상하는 방법에 있어서는, 먼

저 수신광신호의 SOP를 알아낼 필요가 있다<sup>1,2</sup>. 이 경우에서, 수신광신호의 SOP 측정장치는 두 가지 사항을 만족하여야 한다. 첫 번째는 보다 빠르게 SOP를 찾아낼 수 있어야 한다. 이는, 온도변화나 진동과 같은 광섬유 전송선로 주변환경의 변화로 인해 수신광신호의 SOP가 수시로 변할 수 있기 때문이다<sup>3,4</sup>. SOP 변화에 대한 적응성이 떨어지면 PMD 보상장치의 성능이 악화된다. 두 번째는 정확한 측정이 가능해야 한다. SOP 측정의 오차(error)

\* 이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2004-041-D00489)

\* 명지대학교 통신공학과 광통신연구실(sshin@mju.ac.kr)

논문번호: KICS2007-10-467, 접수일자: 2007년 10월 8일, 최종논문접수일자: 2007년 12월 10일

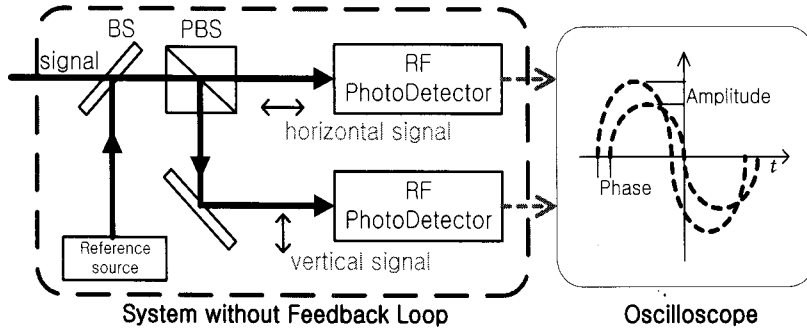


그림 1. 순방향 실시간 SOP 측정의 기본 원리

는 주로 측정장치에 의한 SOP의 변화에 의한 것이다. 측정장치 내부에서의 SOP 변환은 장치를 구성하는 편광의존성 광학소자에 의해 발생한다. 부정확한 SOP 측정으로 인해 PMF에 입사하는 SOP가 적합한 상태가 아니면 PMD 보상이 이루어지지 않는 경우가 있을 수 있다.

PMF를 이용한 PMD 보상 방법 중, PMF 앞 단에서 QWP(Quarter Wave Plate)와 HWP(Half Wave Plate)를 모든 각도로 돌려가면서 PMF를 통해 출력되는 바를 모니터링 맵(mapping)으로 작성하고, 이를 참조하여 다시 QWP와 HWP의 각도를 조정하여 SOP를 변환하는 방법이 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 방법은 장치 내부 요인으로 인한 SOP 변환까지도 모니터링 맵에 반영되어 오차를 보정하는 별도의 과정이 필요 없으나, 모니터링 맵을 작성하는데 소요되는 시간으로 인해 수신광신호의 SOP 변화에 대한 적응성이 떨어진다.

PMD 보상장치 전단에서 SOP를 추적하여 제어하는 방법<sup>[2]</sup>은 보다 빠른 SOP 측정으로 수신광신호의 SOP 변화에 대한 적응성을 향상시켰다. 여기에서는, 국부발진신호(기준 광신호)를 수신 광신호에 중첩시키는 코히어런트 검파 방식<sup>[5]</sup>을 적용하였다. 기준 광신호와 수신 광신호 간의 주파수 차이에 의해 비트신호(beat-signal)가 발생하고, 비트신호는 두 광파의 SOP에 따라 파워(power)가 달라진다. 두 광신호의 SOP가 일치할 때 비트신호의 파워는 최대가 된다. 이를 이용하여, 비트신호를 주파수 영역에서 측정하면서 그 파워가 최대가 될 때까지 기준광신호의 SOP를 변화시킴으로써 수신광신호의 SOP를 찾는다. 이때, 비트신호의 측정과 기준광신호의 SOP 변환 사이에 존재하는 귀환(feedback)의 횟수가 적을수록 SOP 추적이 빨라지며, 이를 위해 단 3번의 비트신호의 측정만으로 수

신광신호의 SOP를 알아낼 수 있는 알고리즘이 소개된 바 있다<sup>[6,7]</sup>.

SOP를 측정하는 방법 중에서 동작속도가 가장 빠른 것은 두 광파에 의한 비트신호를 수직 선형편광성분과 수평 선형편광성분으로 분리하여 측정하는 방법<sup>[8]</sup>이라고 여겨진다. 이러한 방법은 비트신호를 시간 영역에서 측정하며, 귀환 구조가 없이 실시간으로 SOP 측정이 이루어지도록 한 것이다. 이에 대한 원리를 본 논문의 II에서 설명한다. 또한, 보상기 전단에서 미리 수신광신호의 SOP를 측정하는 방식에서는 SOP 측정의 오차를 반드시 보정(calibration)해 주어야 한다. 그 보정 방법에 대해서는, 본 논문의 III에서 설명한다. IV에서는 소개하는 실시간 SOP 측정장치를 모델링(modeling)하고 오차보정의 방법을 적용한 모의실험(simulation)의 결과를 다룬다. 이어서, V에서는 실시간 SOP 측정장치를 꾸미고 실험한 결과를 보여주며 VI에서 결론을 맺는다.

## II. 실시간 SOP 측정의 원리

단색광이고 연속파(continuous wave)인 광파의 SOP는 진폭  $E_{0sx}$ 와 위상  $\epsilon_{sx}$ 을 갖는 수평 선형편광(linear horizontal polarization)성분과 진폭  $E_{0sy}$ 와 위상  $\epsilon_{sy}$ 를 갖는 수직 선형편광(linear vertical polarization)성분이 동일한 각주파수(angular frequency)  $\omega_s$ 로 진행되는 것이라고 간주할 수 있다. 그림 1에서의 같이, 광분리기(BS : Beam Splitter)로 수신광신호가 기준광신호와 같은 경로를 가지도록 하고 편광분리기(PBS : Polarization Beam Splitter)로 수평 선형편광성분과 수직 선형편광성분으로 나누면<sup>[10]</sup>, 수신광신호의 수평 선형편광성분은 진폭  $E_{0Lx}$ 와 위상  $\epsilon_{Lx}$ 을 갖는 기준광신호의 수평 선형편광성분과

중첩이 일어나고 수신광신호의 수직 선형편광성분은 진폭  $E_{0Ly}$ 와 위상  $\varepsilon_{Ly}$ 를 갖는 기준광신호의 수직 선형편광성분과 중첩이 일어난다. 이러한, 수평 선형편광성분끼리의 중첩된 강도(intensity)  $I_x$ 와 수직 선형편광성분끼리의 중첩된 강도  $I_y$ 는 다음과 같다<sup>[11]</sup>.

$$\begin{aligned}
 I_x &= E_{0Sx}^2 + E_{0Lx}^2 \\
 &\quad + 2E_{0Sx}E_{0Lx} \cos[(\omega_s - \omega_L)t + (\varepsilon_{Sx} - \varepsilon_{Lx})] \\
 I_y &= E_{0Sy}^2 + E_{0Ly}^2 \\
 &\quad + 2E_{0Sy}E_{0Ly} \cos[(\omega_s - \omega_L)t + (\varepsilon_{Sy} - \varepsilon_{Ly})]
 \end{aligned} \tag{1}$$

$I_x$ 와  $I_y$ 를 RF(Radio Frequency) 광검출기(PD : PhotoDetector)로 검출하면, 두 광파의 주파수  $\omega_s$ 와  $\omega_L$ 의 차이  $\omega_B = \omega_s - \omega_L$ 로 인해 발생하는 비트신호인  $\cos$ 항만이 검출된다.  $I_x$ 로부터의 수평성분 비트신호와  $I_y$ 로부터의 수직성분 비트신호를 따로 검출하여 시간 영역에서 동시에 관찰한다.

두 비트신호는 동일한 주파수  $\omega_B$ 를 가지지만, 두 비트신호의 진폭 비율과 위상차는 수신광신호와 기준광신호의 SOP에 따라 다르다. 기준광신호의 SOP를 알고 있다면, 기준광신호의 수평 선형편광성분과 수직 선형편광성분 간의 진폭 비율  $\beta = E_{0Lx}/E_{0Ly}$ 와 위상차  $\Delta\varepsilon_L = \varepsilon_{Lx} - \varepsilon_{Ly}$ 을 알 수 있다. PD로 광/전 변환한 뒤, 오실로스코프로 측정하여 얻어지는 수평성분 비트신호의 측정 진폭  $V_x$ 와 수직성분 비트신호의 측정 진폭  $V_y$ 는 다음과 같은 비례관계가 성립한다.

$$\alpha = \frac{V_y}{V_x} = \frac{E_{0Sy}E_{0Ly}}{E_{0Sx}E_{0Lx}} \tag{2}$$

또한, 두 비트신호 간의 위상차  $\Delta\varepsilon$ 는 수신광신호의 상대적인 위상차와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\varepsilon_{Sx} - \varepsilon_{Sy} = \Delta\varepsilon + \Delta\varepsilon_L \tag{3}$$

따라서, 얻고자 하는 수신광신호의 존스 벡터(Jones vector)를 다음과 같이 작성할 수 있으며,

$$\mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{1+(\alpha\beta)^2}} \exp(i\varepsilon_{Sx}) \\ \frac{\alpha\beta}{\sqrt{1+(\alpha\beta)^2}} \exp(i\varepsilon_{Sy}) \end{bmatrix} \tag{4}$$

이를 스톡스 값(Stokes parameters)으로 변환하면 다음과 같다<sup>[9]</sup>.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \frac{1 - (\alpha\beta)^2}{1 + (\alpha\beta)^2} \\
 S_2 &= \frac{2\alpha\beta}{1 + (\alpha\beta)^2} \cos(\Delta\varepsilon + \Delta\varepsilon_L) \\
 S_3 &= \frac{-2\alpha\beta}{1 + (\alpha\beta)^2} \sin(\Delta\varepsilon + \Delta\varepsilon_L)
 \end{aligned} \tag{5}$$

특별히, 선형편광기(Linear Polarizer)를 사용하여 기준광원이 45°선형 편광 되도록 하는 것이 유리하다. 이는, 기준광원이 수직 선형편광 되거나 수평 선형편광 되어 있으면 수직과 수평 성분 중 하나의 비트신호를 검출할 수 없어, 수신광신호의 SOP를 찾을 수 없는 상황을 피하기 위한 것이다. 또한, 기준광원의 파워가 수직과 수평 방향으로 동등하게 분배되도록 하기 위한 것이기도 하다. 그러면,  $\Delta\varepsilon_L = 0$  이고,  $\beta = 1$ 이 된다.

### III. SOP 측정 오차의 보정

#### 3.1 측정오차 해석

SOP 측정장치를 구성하는 광소자가 광섬유로 pig-tailed되어 있다면, 광섬유의 편광의존성으로 인해 측정오차가 발생한다. 예를 들어, 단일모드 광섬유(SMF: Single-Mode Fiber)로 입력되는 SOP와 출력되는 SOP 사이에 큰 차이가 발생할 수 있다. SMF가 1m 이하의 짧은 길이라 할지라도 SOP 변화는 피할 수 없다. 이는 광섬유가 가지는 복굴절에 의해 광신호가 리타던스(retardance)를 겪기 때문이다. 편광의존성이 있는 광소자는 그림 2와 같이, 복굴절 축 FA(Fast Axis)와 SA(Slow Axis)가 서로 수직인 하나의 리타더(retarder)로 간주할 수 있다. 복굴절 각도  $j$ 의 리타더로 입사하는 SOP의 존스 벡터  $\mathbf{J}_m = J_x \text{ in } \mathbf{a}_x + J_y \text{ in } \mathbf{a}_y$ 가 FA와 SA로 벡터 분리되어 복굴절 축을 따라 진행할 때, FA와 SA의 위상지연(retardation)의 상대적인 차이인 리타던스  $D$ 를

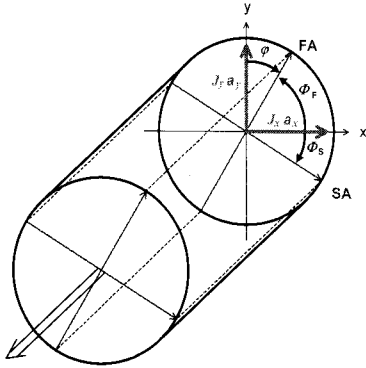


그림 2. 리타던스를 통한 SOP의 변환

견는다<sup>[11]</sup>. 따라서, 입력 존스 벡터는  $j$ 와  $D$ 에 의해 다음과 같이 출력 존스 벡터  $J_{out} = J_{x out} a_x + J_{y out} a_y$ 로 변환된다.

$$\begin{aligned}
 J_{x out} &= \exp(iD/2)(J_{x in} \sin \phi + J_{y in} \cos \phi) \sin \phi \\
 &\quad + \exp(-iD/2)(J_{x in} \cos \phi - J_{y in} \sin \phi) \cos \phi \\
 J_{y out} &= \exp(iD/2)(J_{x in} \sin \phi + J_{y in} \cos \phi) \cos \phi \\
 &\quad - \exp(-iD/2)(J_{x in} \cos \phi - J_{y in} \sin \phi) \sin \phi \quad (6)
 \end{aligned}$$

FA와 SA의 굴절률차가  $10^{-7}$ 인 전형적인 SMF일 경우, SOP가 스톡스 벡터  $[1, 1, 0]$ 인 파장 1550nm의 광파가 1m 길이의 광섬유를 통과하고  $j$ 가  $45^\circ$ 라고 가정하면 출력 스톡스 벡터는  $[0.9190, 0, 0.3944]$ 로 변환된다. 이러한 SOP 측정장치 내부의 편광의 존성 광소자로 인한 SOP의 변화는 곧바로 심각한 측정오차를 초래한다.

### 3.2 오차보정의 원리

일반적으로,  $j$ 와  $D$ 는 광소자 주변상황에 따라 다르다. 광섬유의 경우, 외부로부터의 압착(stress), 주변 온도, 구부러짐(곡률반경을 가지고 휘어있는 경우) 등에 따라 복굴절 특성이 모두 다르다. 특히, 리타던스는 파장에 의존하기 때문에 입력광의 파장에 따라  $D$ 의 값이 다르다. 주변상황에 따라 광소자의 복굴절 특성이 모두 다르기 때문에, SOP 측정 전에 반드시 오차보정을 해야 하며 측정 과정 중에서도 수시로 오차보정을 해결 필요가 있다. 그러나, 편광의존성 광소자의 SOP 입, 출력 특성을 통해 오차보정을 하려 할 때마다  $j$ 와  $D$ 를 알아내는 것은 매우 힘든 일이다. 따라서, 보다 간편한 오차보정의 방법이 요구된다.

이를 위해 본 연구에서는 뽀앙카레 구(Poincaré

sphere)를 이용하여 간단하면서도 정확한 오차 보정 방법을 도출하였다. 어떠한 복굴절 매질의 SOP 입, 출력을 뽀앙카레 구로 표현하면, SOP 입, 출력 사이에 일정한 변환관계가 있음을 알 수 있다. 그림 3.(a)와 같이, 회전하는 선형편광기를 통해 여러 가지 선형편광이  $j$ 와  $D$ 가 일정한(SMF의 경우, 외부로부터의 압착이나 온도, 곡률반경의 변화가 없는 경우) 리타더에 입력된다고 가정하자. 만약, 매질이 복굴절을 가지지 않았다면 선형편광기의 회전각도에 따른 출력 SOP의 궤적이 뽀앙카레 구의 적도선상에 나타난다. 그러나, 선형 SOP가 복굴절 매질을 통과한 출력 SOP의 궤적은 뽀앙카레 구의 적도면이 회전이동한 형태의 원으로 형성된다. 이는, 임의의 복굴절 매질을 통과한 임의의 입력 SOP는 뽀앙카레 구상에서 회전 이동한 형태로 출력된다는 것을 보여주는 것이다.

이러한 복굴절 매질에 대한 SOP 입, 출력의 회전 이동 관계를 이용하면 쉽게 출력 SOP에 대한 입력 SOP를 알아낼 수 있다. 뽀앙카레 구를 알맞게 회전 이동하여 출력 SOP를 읽으면 입력 SOP가 되므로, 먼저, 뽀앙카레 구의 좌표축, 즉, 그림 3.(b)에서의 스톡스 벡터  $S_1, S_2, S_3$ 가 어디로 회전 이동하였는지 알아내야 한다. 복굴절 매질에 수평 선형편

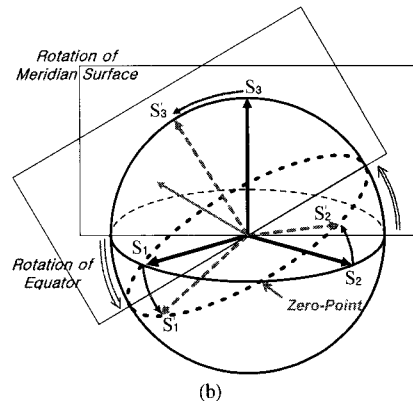
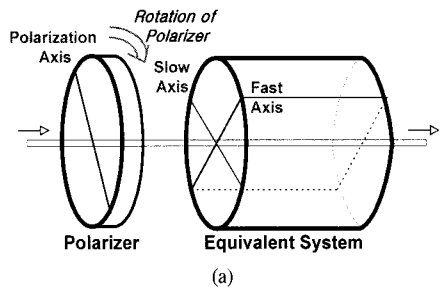


그림 3. (a) 리타더로의 선형편광 입력, (b) 리타던스 보정을 위한 뽀앙카레 구의 회전

광을 입력하였을 때의 측정된 출력 SOP는 뿔앙카레 구에서의 스톡스 벡터  $S_1$ 이 회전 이동한 벡터  $S'_1$ 이 되고, 마찬가지로,  $45^\circ$ 선형편광 입력에 대한 출력 SOP가 좌표축  $S_2$ 가 회전 이동한  $S'_2$ 가 된다. 좌표축  $S'_1, S'_2, S'_3$ 는 상호간에 직교의 관계를 가지므로, 좌표축  $S_3$ 가 회전 이동한  $S'_3$ 은 벡터  $S'_1$ 에서 벡터  $S'_2$ 으로의 외적(cross product)으로 쉽게 구하여진다. 임의의 입력 SOP에 대한 출력 스톡스 벡터에 미리 구해놓은  $S'_1, S'_2, S'_3$ 를 각각 내적(dot product)한 값이 그 출력 SOP에 대한 입력 SOP의 스톡스 값이 된다. 이것은 왜곡되어 출력된 SOP의 원래의 값을 복원하여 오차를 보정한 것이다.

오차보정이 요구될 때마다 입력에 선형편광기를 삽입하여 수평 선형편광과  $45^\circ$ 선형편광에 대한 출력 SOP를 측정하는 것으로 보정의 과정은 완료된다. 이것은  $j$ 와  $D$ 를 알지 못하더라도 쉽고 간편하며 정확하게 오차를 보정할 수 있는 새로운 방법이다.

#### IV. 모의실험

보정을 통하여 입력 SOP를 찾는 과정을 모의실험(simulation) 하기위해 그림 1의 실시간 SOP 측정장치를 그림 4와 같이 등가 모델을 이용하여 모델링 하였다. 장치가 입력 SOP를 왜곡시킨다면, 그 요인이 어떠한 것이든 간에, 장치에 의한 SOP 변화의 원인, 즉, 측정오차의 원인을 하나의 리타더로 등가(equivalence) 하여 놓을 수 있다. 그러나, 그림 4에서는 수신광신호  $S$ 와 기준광신호  $L$ 이 서로 다른 리타더를 통과하는 것으로 모델링 해놓았다. 이는, 수신광신호와 기준광신호의 파장이 달라 동일한 리타더를 통과 할지라도  $S$ 와  $L$ 이 겪는 리타던스  $D$ 가 다르기 때문이다. 그러므로, 리타던스  $D_1, D_2$ 는 임의의 값으로 서로 다르게 설정하고 복굴절 축의 각도  $j$ 는 임의의 값으로 같게 설정해 주었다.

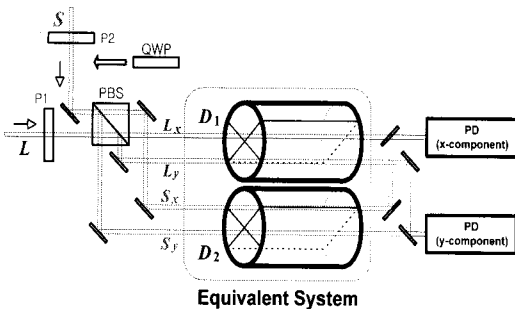


그림 4. 실시간 SOP 측정 시스템의 등가 모델

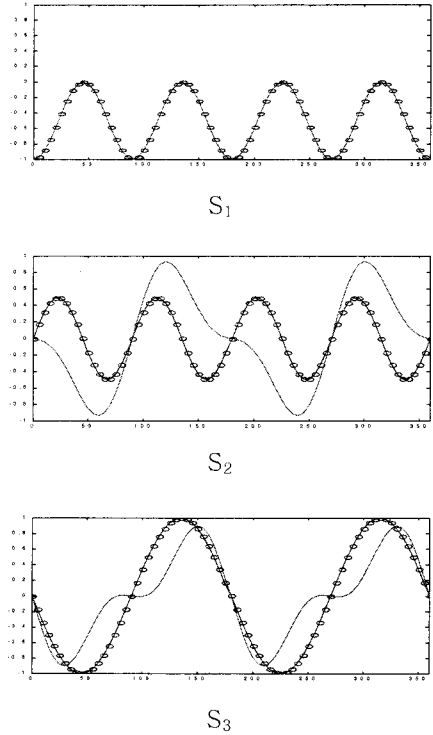


그림 5. 모의 실험 결과(실선: 등가 시스템으로 입력되는 SOP, 점선: 등가 시스템을 통과하여 출력되는 SOP, o 마크: 보정된 SOP)

선형편광기 P1의 편광축을  $45^\circ$ 로 놓아 기준광신호의 SOP를  $45^\circ$ 선형편광이 되도록 하였다. 일반적으로, 수신광신호의 파위는 기준광신호의 파위에 비하여 미약한 신호이다. 그래서, 수신광신호의 크기를 기준광신호 보다 3dB 작게 설정하여 모의실험을 수행하였다.

모의실험의 순서로서, 먼저, 오차보정을 위해 수신광신호의 입력단에 선형편광기 P2만을 삽입하였다. II.3에서 설명한 바와 같이, P2를 조정하여 수평 선형편광으로 입력하였을 때의 출력의 SOP  $S'_1$ 과,  $45^\circ$ 선형편광으로 입력된 SOP에 대한 출력 SOP  $S'_2$ 를 얻고,  $S'_1$ 의  $S'_2$ 로의 외적으로  $S'_3$ 를 구하였다. 다음으로, 측정된 값과 입력되는 SOP를 비교해보는 모의실험을 위해, P2의 편광축을 일정하게 고정시켜 놓고 QWP가 삽입되어 회전한다고 가정하였다. P2의 편광축과 QWP의 FA 사이의 각도로부터 QWP를 빠져 나오는 빛의 SOP를 계산할 수 있다. QWP를 빠져 나오는 빛의 SOP가 측정장치(혹은, 등가 시스템)로 입력되는 SOP가 된다. 출력 SOP, 즉, 장치의 오차로 인하여 왜곡되어 측정된 SOP의 스톡스 값은 이미 구해진  $S'_1, S'_2, S'_3$ 에 각각 내적하여 입력

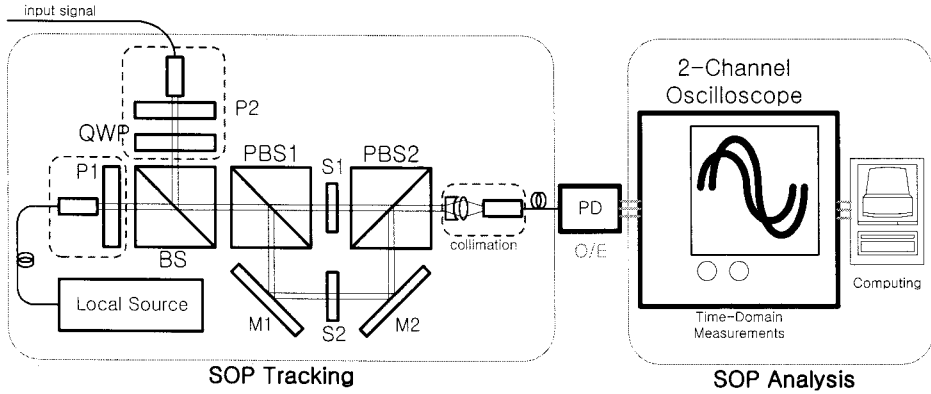


그림 6. 순방향 실시간 SOP 측정 실험 장치

SOP의 스톡스 값을 추출 하도록 하였다. 출력 스톡스 벡터를  $S'_1$ 에 내적하여 입력 SOP의 스톡스 값  $S_1$ 을 얻고, 마찬가지로  $S_2$ 와  $S_3$ 는 출력 스톡스 벡터를 각각  $S'_2$ 와  $S'_3$ 에 내적하여 얻어진다.

이상과 같은 순서로 실행한 모의실험의 결과를, 그림 5에서, QWP의 회전 각도에 따른 스톡스값  $S_1, S_2, S_3$ 의 변화로 보이고 있다. 실선은 등가 시스템으로 입력되는 SOP이고, 점선은 등가 시스템을 통과하여 출력된 SOP를 나타낸다. 'o'표시는 보정 과정을 거쳐 입력 SOP를 추정한 값으로, 입력 SOP와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### V. 실험 및 결과

II장에서 소개한, 그림 1의 실시간 SOP 측정장치를 그림 6과 같은 실험장치로 구성하고 QWP로부터 출력되는 SOP를 측정하였다. 모의실험에서와 똑같이, P1으로 기준광신호의 SOP를 45°선형편광이 되도록 하였다. 측정이 이루어지기 전 오차보정을 위해서는 P2만을 사용하고, SOP 측정을 위해서는 P2는 고정하고 QWP를 회전시켰다.

수신광신호는 파장이 1550.0nm인 레이저 다이오드를 사용하였으며, 기준광신호는 파장가변 레이저 장치를 사용하였다. 두 신호간의 비트성분을 얻기 위해서는 두 신호의 파장 혹은 주파수 간격이 매우 좁고 정확해야 하므로 광스펙트럼 분석기(OSA)로 모니터링을 하면서 적절한 비트 주파수를 얻을 때까지 기준광신호의 파장을 조율하였다. 조율 결과, 약 1550.004nm로 기준광신호의 파장이 설정되었으며, 이 결과 그림 7과 같이 비팅 주파수가  $\omega_B/2\pi = 490\text{MHz}$ 인 신호를 얻었다.

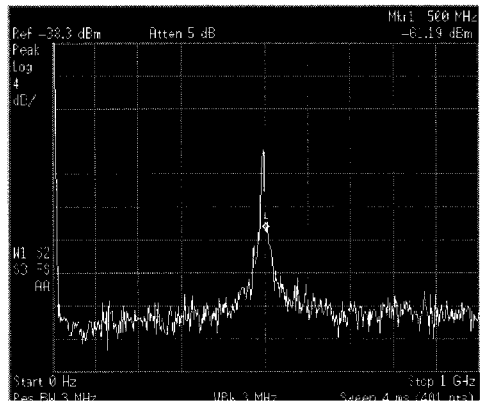


그림 7. 주파수 영역에서 측정된 비트 주파수

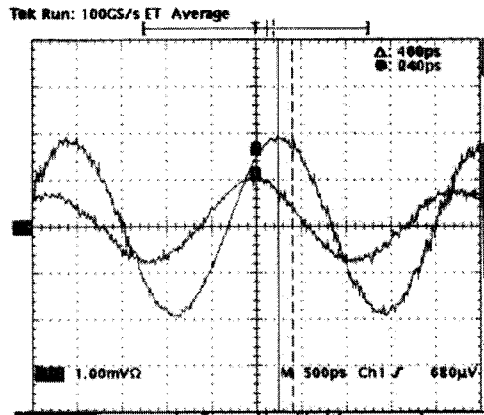


그림 8. 시간 영역에서 측정된 수평편광 성분 및 수직편광 성분의 비트 신호

PD는 25GHz의 대역폭을 갖는 RF PD를 사용하였고, 셔터(S1과 S2)를 열고 닫아 수평성분의 비트 신호와 수직성분의 비트신호를 각각 따로 검출하였

다. 검출된 비트신호들은 오실로스코프를 사용하여, 그림 8과 같이, 시간 영역에서 측정하였다.

실험의 장치를 통해 측정하고 오차보정을 거친 SOP와 QWP의 회전각도로부터 계산된 SOP(입력 SOP)를 나타낸 것이 그림 9이다.

입력 SOP는 실선으로 나타내었다. 실험은 QWP를 0°에서 360°로 10°간격으로 회전시키면서 측정하였다. QWP의 360°회전이 완료되면, 오차의 가장 큰 원인이 되는 PD 전단의 광섬유를 다시 위치하고 고정시켜, 오차보정의 과정부터 다시 측정하였다. 이것을 10회 반복하고, 그 평균치를 그림 9에 '+'로 표시하였다. 보는 바와 같이, 상당히 정확한 측정이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

### VI. 결 론

본 논문에서는 적게는 수 차례에서 많게는 수 천 차례의 광학적인 귀환을 요구하는 기존의 SOP 측정 방법들에 비해 단 한 번의 순방향 측정만으로 인해 빛의 SOP 값을 실시간 적으로 측정할 수 있는 새로운 방법을 소개하였다. 소개한 방법은 장치

에 소요되는 전자회로의 동작속도에 의해서만 그 측정 속도가 제한을 받게 되어 수  $\mu\text{sec}$  이내로 SOP 측정이 완료된다. 이는 기존 방식에서 광학적인 귀환을 할 때마다 기준광신호의 SOP를 변화시키기 위하여 기계적인 혹은 전기적인 SOP 변환 장치를 동작시킴으로 인해 발생하는 시간이 제거됨으로 인해 가능하게 된 것으로 기존 방식에서 소요하는 최소 수십 msec에서 수 sec의 측정시간을 수천 배에서 수백만 배 이상 단축시키는 획기적인 결과이다. 특히 본 방식은 SOP 측정을 위해 수신되는 신호를 분기하는 것에 있어서 기존의 공간 분배방식<sup>[12]</sup>과 같이 전체 파워를 나누는 것이 아닌, 수직편광성분과 수평편광성분으로 나누어 검출하기 때문에 수신감도를 크게 향상시킨다. 제안한 방식의 동작 및 성능을 컴퓨터 모의실험 및 광학 실험을 통해 입증하였다. 또한 측정 시 주변 환경에 따른 측정 시스템 내 광소자의 복굴절 변화로 야기될 수 있는 SOP 측정 오차를 보정하기 위해 새로운 방법을 제안하였으며, 이 방법은 광소자의 복굴절각도  $j$ 와 리타던스  $D$ 에 대한 정보를 필요로 하지 않으므로 간단하고 빠르게 정확하게 오차를 보정할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] Hiroki Ooi, Yuichi Akiyama, and George Ishikawa, "Automatic Polarization Mode Dispersion Compensation in 40-Gbit/s Transmission," *Technical Digest of OFC'99*, Vol. 2, pp. 86-88, 1999.
- [2] S. Shin, I. Yeo, H. Song, J. Park, Y. Park, and B. Jo, "Real-time Endless Polarization Tracking and Control System for PMD Compensation," *Technical Digest of OFC'01*, Vol. 2, pp. TuP7-1-TuP7 -3, 2001.
- [3] Y. Namihiro, T. Kawazawa, and H. Wakabayashi, "Field Demonstration of Endless Polarization Control in 195-km Installed Optical Fiber Submarine Cable at a Sea Depth of 2900m," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 3, No. 4, pp. 384-386, 1991.
- [4] G. Nicholson, and D. J. Temple, "Polarization Fluctuation Measurements on Installed Single-Mode Optical Fiber Cables," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 7, No. 8, pp. 1197-1200, 1989.

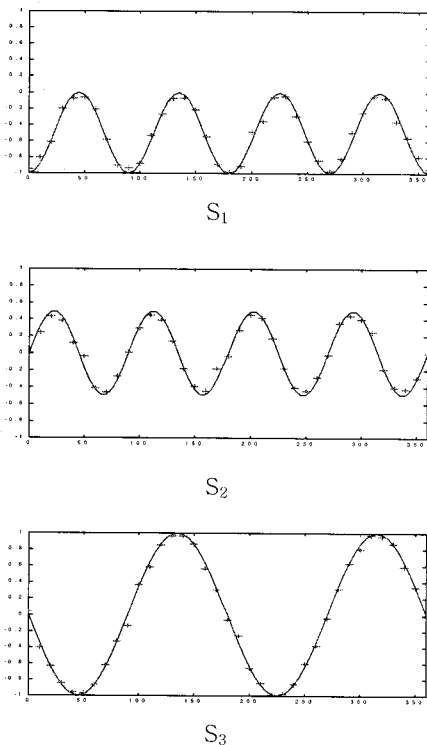


그림 9. 오차 보정 과정을 거친 실험 결과(실선: 입력 SOP, + 마크: 보정이 완료된 측정 SOP)

[5] S. Betti, G. DeMarchis, and E. Iannone, "Coherent Optical Communications Systems," John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[6] Hongsuk Song, Hyunsoo Jung, and Seoyong Shin, "Simple and Fast SOP Tracking Algorithm Employing Three-Point Measurement Technique," *Technical Digest of CPT2002*, F2, pp. 125-126, 2002.

[7] 송홍석, 정현수, 신서용, "편광모드분산 보상을 위한 세 점 측정방식의 편광상태 추적 알고리즘", *한국통신학회논문지*, 제 27권(2B), pp. 177-183, 2002.

[8] R. Calvani, R. Caponi, and F. Cisternino, "Real-Time Heterodyne Fiber Polarimetry with Narrow and Broad-Band Sources," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. LT-4, No. 7, pp. 877-883, 1986.

[9] J. P. Gordon, and H. Kogelnik, "PMD Fundamentals: Polarization Mode Dispersion in Optical Fibers," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. PNAS*, vol. 97, No. 9, pp. 4541-4550, 2000.

[10] S. Huard, "Polarization of Light," John Wiley & Sons, Inc., 1997.

[11] E. Hecht, "Optics," 3rd Ed., Addison-Wesley, pp.285-432, 1998.

[12] D. Derickson, "Fiber Optic Test and Measurement," Prentice-Hall, Inc., pp. 220-245, 1998.

정 현 수 (Hyunsoo Jung)

준회원

2001년 2월 명지대학교 전기전자공학부 졸업

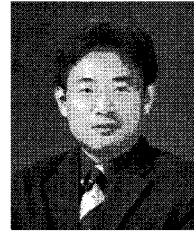
2001년 3월~2003년 2월 명지대학교 정보통신공학과 석사

2003년 2월~2006년 5월 (주) 테라디안

<관심분야> 자동 편광제어 시스템, 편광모드분산 보상, 광트랜시버

신 서 용 (Seoyong Shin)

종신회원



1987년 2월 서울대학교 제어계측공학과 공학사

1989년 8월 Florida 공과대학교 전기전자공학과 공학석사

1992년 12월 Texas A&M 대학교 전기전자공학과 공학박사

1993년 2월~1994년 8월 한국전자통신연구원 선임연구원

1994년 9월~현재 명지대학교 통신공학과 교수

<관심분야> EDFA 이득제어, 광CDMA, 광가입자망, PMD보상