

코히어런트 광통신을 위한 무한 편광제어 시스템

정희원 신서용*, 김수환*, 이주활*

Endless Polarization Control System for Coherent Optical Communications

Seoyong Shin*, Soo-Whan Kim*, Joo-Whal Lee* *Regular Members*

요 약

코히어런트 광통신 시스템의 수신부에서 원래의 기저대역 신호를 복원하기 위해서는 전송된 광신호와 국부 발진 신호간의 편광제어가 필요 불가결하다. 즉, 신호 복원을 위해서는 국부발진 신호의 편광을 항상 수신 신호의 편광과 일치되게 제어를 해 주어야 한다. 이 논문에서는 이러한 목적을 수행할 수 있는 새롭게 개발한 고속의 무한 편광제어기를 소개한다. 편광제어기는 연속적인 제어를 위해 네 개의 위상 지연기로 구성되어 있다. 제안하는 편광제어기는 두 가지 측면에서 기존의 편광제어기에 비해 그 동작속도가 월등히 향상되었다. 하나는 위상 지연의 수단으로 액정에 전압을 인가하는 방법을 사용함으로써 기존의 광섬유를 압착하는 방식에 비해 동작속도가 크게 개선되었으며 다른 하나는 새로운 알고리즘을 적용하여 편광제어를 수행함으로써 제어를 위한 계산 시간을 최소화하였다. 인가 전압에 대한 액정의 반응시간은 수십 msec이며 새로운 알고리즘에 의해 정확한 편광점을 계산하는데 걸리는 시간은 300MHz 컴퓨터를 이용하는 경우 수십 nsec에 불과해 편광제어기의 전체 동작시간은 액정의 반응시간에 의해 제한을 받게 되어 수십 msec에 불과하게 되었다. 이는 본 논문에서 제안하는 편광제어기의 동작속도가 기존 편광제어기의 동작속도보다 100배 이상 빠름을 의미한다.

ABSTRACT

Polarization control between transmitted optical signal and local oscillator signal in coherent optical communication system is indispensable to recover original baseband signal at the receiver. This means that we always need to control state-of-polarization(SOP) of local oscillator signal to be matched to that of received signal. In this paper, we introduce a newly developed high speed endless polarization controller to solve this problem. It is composed of four phase retarders for endless control. Operation speed of the proposed polarization controller is improved much comparing with previous ones in two aspects. One is that we improved operation speed a lot by employing liquid crystals (LCs) instead of fiber compression for phase retardation, and the other is that we minimized calculation time of polarization control by using newly developed peak-search algorithm. Operation time of LC to its bias voltage is several tens of milliseconds and the calculation time for exact polarization point is several tens of nanoseconds when we use 300MHz computer, so that overall operation time of polarization controller is limited by the operation time of LC and its value is only several tens of milliseconds. This means that operation speed of the proposed polarization controller is more than 100 times faster than that of previous ones.

* 명지대학교 정보통신공학과 광통신 연구실(sshin@wh.myongji.ac.kr)

논문번호 : 99049-0204 접수일자 : 1999년 2월 4일

* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : 971-0918-111-2)지원으로 수행되었음.

1. 서론

현재의 광통신 시스템은 송신부에서 전기신호를 광신호로 변환한 후 이를 직접 강도 변조(Intensity Modulation)하여 전송하고 수신부에서는 수신된 광신호를 직접 검파(Direct Detection)하는 IM-DD 방식을 사용하고 있다. 이 방식으로 현재 2.5Gb/s의 광통신이 실용화되었으며 조만간 10Gb/s급의 광통신도 실현될 전망이다. 그러나 광소자를 제어할 수 있는 전자소자의 속도 한계 등으로 인하여 10Gb/s 급 이상의 광통신에 대해서는 IM-DD 방식이 적용되기 어려울 것이다. 따라서 수백 Gb/s급 혹은 그 이상의 Tb/s급 광통신을 실현하기 위해서는 서로 다른 파장으로 강도 변조된 여러 채널의 신호를 파장분할 다중화시키는 WDM (Wavelength Division Multiplexing) 광통신 방식, 혹은 광 캐리어 자체에 변조 신호를 가함으로써 주파수 분할 다중화, 즉 FDM (Frequency Division Multiplexing)이 가능하고 수신단에서는 수신감도의 극대화를 위해 코히어런트 검파방식을 적용하는 코히어런트 광통신 방식 등이 연구되고 있다.

WDM에서는 채널간의 간격을 비교적 넓게 (0.8nm 이상) 설정함으로써 채널간의 4파혼합과 같은 비선형 현상에 의한 신호의 누화를 방지하고 수신단에서 필터를 구현하는데 어느정도의 여유를 줄 수 있다. 그러나 현재 사용 가능한 광섬유의 대역폭을 장거리 광통신에서 필수적으로 이용되고 있는 어븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA)의 사용가능한 좁은 선형 이득 대역폭에 비추어 고려할 때 파장 다중화를 위한 파장의 선택폭이 매우 좁아지게 된다. 예를 들어, EDFA의 선형 이득 대역폭이 약 20nm 이고 각 채널의 강도 변조된 신호의 속도가 10 Gb/s이며 채널간의 파장 간격이 1nm라면, WDM에 의한 광통신 시스템의 전체 용량은 약 200 Gb/s에 불과하게 된다. 이는 현재 급속도로 증가하고 있는 데이터, 음성, 동영상 등 각종 서비스와 앞으로 훨씬 더 다양하고 많은 용량을 필요로 할 신규 서비스 등을 고려할 때, 머지않은 장래에 곧 그 한계에 도달할 것으로 예상된다.

따라서 EDFA의 이득 대역폭 한계 내에서 최대한의 다중화를 통해 수십 Tb/s급의 광통신이 가능하고 더 나아가 수신기의 수신감도까지 향상시킴으로써 매우 고가인 EDFA의 사용을 줄여 경제적인 효과까지 얻을 수 있는 방안으로 FDM 방식에 의한 코히어런트 광통신이 최근 다시 각광을 받고 있

다^{[1]-[3]}. 코히어런트 광통신은 IM-DD 방식에서 EDFA를 수신단의 전치증폭기로 사용함으로써 수신 감도를 크게 향상시키게 된 이래로 코히어런트 검파 방식의 특성인 수신감도에 대한 장점이 크게 약화되어 이에 대한 연구가 일시적이거나 위축되었으나 높은 주파수 선별도에 의해 채널간 간격이 0.1nm 이하인 고밀도의 FDM이 가능하다는 특성으로 인해 광대역 LAN, 가입자망^[4] 뿐만아니라 광대역 고밀도의 장거리 통신 수단으로 활용하는^{[1],[2]} 연구가 다시 활발하게 진행되고 있다.

코히어런트 광통신이 고용량, 장거리 통신에 실용화되기 위해서는 송신기와 국부발진기 광원으로 이용되고 있는 반도체 레이저의 스펙트럼 선폰이 매우 좁아야 하며 중심 주파수가 안정되어야 하고 FSK, PSK, DPSK 등 각종 변조 방식에 적합한 변조기의 개발이 필요하고 수신부에서는 전송 라인의 EDFA 등에 의한 잡음 요인을 제거해 주어야하며 수신감도를 높이기 위해 전송된 신호와 국부발진기 신호 간의 편광을 일치시켜야 하는 등 여러 가지 해결되어야 할 문제점들이 있다.

이와 같은 여러문제 가운데 전송 신호와 국부발진 신호간의 편광일치는 전송 신호 검파 및 시스템의 수신감도 향상을 위해 필수불가결한 것이다. 이에 본 논문에서는 이러한 편광일치 문제를 해결하기 위해 기존의 광섬유 압착기(fiber squeezer)를 사용하는 방식[5]과 비교해서 액정 광지연기를 사용함으로써 기계적인 요소가 전혀 없어 속도가 매우 빠르며 안정되어 있고 반 영구적인 무한(endless) 편광제어 시스템을 소개하고자 한다.

제 II절에서는 코히어런트 광통신에서 편광제어의 중요성과 이를 해결하기 위해 제안된 각종 방법들에 대해, 제 III절에서는 이러한 편광문제를 분석하고 계산하는 방법에 대해 그리고 제 IV절에서는 액정 광지연기로 이루어진 편광제어기를 사용할 때의 동작원리에 대해 논하였으며 제 V절에서는 액정 편광제어기를 이용한 무한 편광제어의 원리와 이 원리에 입각한 알고리즘에 대해 설명하였다. 제 VI절에서는 제안한 원리를 이용하여 구현한 무한 편광제어 시스템과 이 시스템에서 수행한 편광제어 실험 및 결과에 대해 설명하였으며 끝으로 제 VII절에 결론을 실었다.

II. 편광제어의 중요성 및 구현 방법

IM-DD 방식에서는 입사된 광자의 수에 따라 광

전류가 흐르게 될 뿐 입사된 광신호의 편광상태 (SOP : State of Polarization)는 상관이 없다. 그러나 코히어런트 검파 방식에서는 전송된 광신호의 SOP와 국부발진 광원의 SOP가 일치되어야 본래의 기저대역(baseband) 신호를 검출할 수 있다. 그림 1은 코히어런트 검출방식을 나타낸다. 여기서 전송된 광신호와 국부발진 광원의 E-field는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \overline{E_S} &= \overline{A_S \exp[-i(\omega_S t + \phi_{LO})]} \\ \overline{E_{LO}} &= \overline{A_O \exp[-i(\omega_{LO} t + \phi_{LO})]} \end{aligned} \quad (1)$$

(ω_0 는 carrier 주파수, A_s 는 진폭, ϕ_s 는 위상)

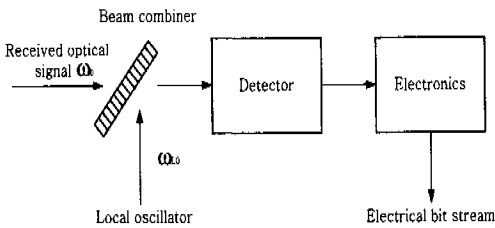


그림 1. 코히어런트 광검출 방식

전송된 광신호와 국부발진기 광신호의 편광상태가 정확하게 일치함을 가정하면 광검출기에서 수신된 광파워는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$P(t) = P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos(\omega_F t + \phi_S - \phi_{LO}) \quad (2)$$

($P_S = KA_S^2$, $P_{LO} = KA_{LO}^2$, $\omega_F = \omega_0 - \omega_{LO}$, K : 상수)

\hat{e}_S 와 \hat{e}_{LO} 를 E_S 와 E_{LO} 의 편광 방향에 대한 단위 벡터라 하면 식 (2)는 $\cos \alpha$ 라는 별도의 항을 내포하게 된다 (α 는 \hat{e}_S 와 \hat{e}_{LO} 간의 각도를 의미함) [6].

$$P(t) = P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos \alpha \cos(\omega_F t + \phi_S - \phi_{LO}) \quad (3)$$

코히어런트 수신은 ω_F 나 $\phi_S - \phi_{LO}$ 값을 검파함으로써 기저대역 신호를 추출하므로 전송신호와 국부발진기 신호간의 편광상태의 차이로 인해 발생하는 α 에 의해 수신기의 감도가 떨어지게 된다. 특히 E_S 와 E_{LO} 의 편광상태가 서로 수직을 이루면 ($\alpha = 90^\circ$), 입력 신호가 사라지게 되는 “complete fading” 현

상이 나타난다. 이와 같이 편광상태가 변해 α 가 변하면 수신 전류값이 달라지고 SNR이 나빠지며 따라서 BER에 영향을 주게 된다. 국부발진기는 수신기 바로 옆에 위치해 있어 편광상태 \hat{e}_{LO} 는 레이저 출력광의 편광상태인 선형편광을 유지하게 된다. 그러나 \hat{e}_S 는 광섬유 주변의 온도 변화나 일정치 않은 기계적인 스트레스 등의 환경 변화에 의해 광섬유의 굴절률 값이 변동하기 때문에 일정한 상태를 유지하지 못한다. 이로 인해 수신 신호의 BER이 변하게 되므로 전송신호의 편광상태에 대해 국부발진기의 편광상태를 제어해서 $\alpha = 0$ 이 되도록 하는 것이 코히어런트 광통신의 관건이라 할 수 있다.

편광일치 문제를 해결하기 위해 지금까지 발표된 방법들로는 무한 편광제어(endless polarization control) 방식, 편광 다이버시티 수신(polarization diversity reception) 방식, 송신부에서의 편광 스크램블링(polarization scrambling) 방식 등이 있으나 이 가운데 후자의 두 방식은 국부발진 신호 혹은 전송신호의 파워를 낭비하는 경향이 있으며 수신기의 열잡음이 합쳐져 수신감도가 떨어지며 수신기 혹은 송신기의 구성이 복잡해지며 시스템에 적용 가능한 소자의 개발이 미흡한 단점이 있다. 이에 반해 무한 편광제어 방식은 현재 가장 실용화에 근접한 방식으로 그 개념도가 그림 2에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 무한 편광제어 방식은 하나 혹은 그 이상의 굴절률 변환기 즉, 광(위상) 지연기로 구성된 편광제어기를 이용하여 전송되어온 신호의 SOP에 따라 국부발진 신호의 SOP를 변환시켜 두 신호의 편광이 일치되도록 해주는 방식이다.

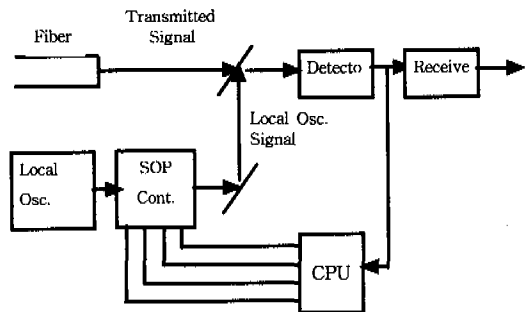


그림 2. 무한 편광제어 방식

무한 편광조절을 위한 초기의 방법은 광파이버에

기계적인 자극을 가해 광섬유의 복굴절이 변하게 함으로써 전송신호와 국부발진기 신호의 SOP를 일치시키는 것이었다. 기계적으로 복굴절을 변화시키기 위해 모터를 사용하거나 PZT(piezoelectric transducer) 등을 사용하였으나 광섬유 자체에 연속적인 기계적 자극으로 인해 손상이 발생하기도 하고 복굴절 변화가 온도에 민감하게 반응하는 등 안정되지 못한 편광을 제어하는데 어려움이 있었으며 편광제어기의 동작속도가 모터나 PZT의 반응 속도에 의해 수 초 이상이었다^{[5],[7],[8]}. 또 다른 방법으로 전기광학 크리스탈^[9], 패러데이 회전기^[10], 회전 wave plate^[11] 등을 사용하기도 했지만 공정이 복잡하고 기계적인 동작이 일정치 않으며 동작 전압 혹은 전류가 너무 높다는 단점이 있었다. 이밖에도 LiNbO₃를 사용한 광집적 소자를 이용해 무한 편광조절을 실현하고자 노력하고 있으나 삽입손실이 크고 반사 및 dc drift 문제 등 많은 문제점이 있다^{[12],[13]}.

이에 반해 액정(Liquid Crystal : LC)을 사용하면 앞에서 언급한 편광조절 방법들에 비해 비교적 저렴하게 시스템을 구성할 수 있고 기계적으로 움직이는 부분이 없어 반영구적이며 10V 이하의 전압이면 충분히 동작 가능하다는 장점이 있다. 특히 액정의 반응속도가 수 msec에 불과해 기존의 편광제어기에 비해 속도가 월등히 개선된 편광제어기를 구현할 수 있다.

III. 편광문제 분석 및 계산방법

편광기(polarizer), 회전기(rotator), 혹은 지연기(retarder) 등을 이용하여 빛의 편광을 제어할 때 이를 분석하는 방법에는 먼저 정성적인 이해를 위해 푸앵카레(Poincaré) 구를 사용하며^[14] 정량적인 계산을 위해서는 존스 행렬(Jones matrix)이나 뮐러행렬(Mueller matrix)과 같은 행렬 계산 방법을 사용한다^[15]. 이러한 방법을 사용하면 편광문제가 간단한 행렬 계산으로 단순해지며 또한 일일이 복잡한 물리현상을 고찰할 필요가 없어져 실수를 범할 확률이 적어지게 된다.

푸앵카레 구의 적도(equator)는 선형 편광상태를 의미하며 각 극(pole)은 우향 혹은 좌향으로 원형 편광된 상태를 의미한다. 구의 그 밖의 부분에 점이 위치하면 타원 편광상태임을 의미한다. 구의 반지름은 빛의 강도를 의미한다. Poincaré 구상에서의 SOP는 S_0, S_1, S_2, S_3 파라미터로 구성된 스토크스 벡

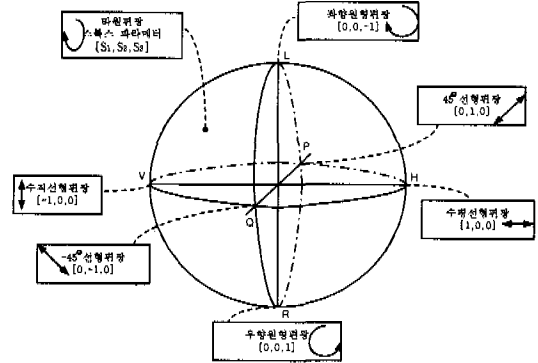


그림 3. 무한 편광제어 방식

터(Stokes vector) $[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$ 를 사용하여 표현한다. 그림 3은 푸앵카레 구와 Poincaré 구상에서의 스토크스 파라미터를 나타낸 것이다.

S_0 는 빛의 강도를 의미하며 푸앵카레 구의 반지름에 해당한다 (S_0 는 항상 일정한 크기, 예를 들어 1값을 갖는다고 가정할 때 생략 가능). S_1 은 빛의 수평 편광성분과 수직 편광성분 크기의 차(difference)를 의미하여 S_1 이 0보다 크면 빛이 수평 편광에 가깝고 0보다 작으면 수직 편광에 가까움을 의미한다. S_2 는 빛의 편광이 어느쪽으로 45° 기울어졌는가를 의미한다. 즉, S_2 가 0보다 크면 +45°, 0보다 작으면 -45° 기울어져 있음을 의미한다. S_3 가 0보다 크면 빛이 우향 편광되었음을, 0보다 작으면 좌향 편광되었음을 의미한다. 이러한 스토크스 파라미터는 구좌표계 ($S_0, 2\chi, 2\psi$)를 사용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다^[16].

$$\begin{aligned} S_1 &= S_0 \cos 2\chi \cos 2\psi \\ S_2 &= S_0 \cos 2\chi \sin 2\psi \\ S_3 &= S_0 \sin 2\chi \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 χ (chi)는 타원율, ψ (psi)는 편광각을 의미한다. 따라서 빛의 스토크스 파라미터 값을 알면 식(4)로부터 타원율과 편광각을 구할 수 있으며 이를 이용해 빛의 편광상태를 푸앵카레 구상에 점 $Q(S_0, 2\chi, 2\psi)$ 로 표현할 수 있다[그림 4 참조]. 혹은 이와 반대로 타원율과 편광각을 알면 빛의 스토크스 파라미터 값을 알 수 있다.

코히어런트 광통신에서 전송된 신호의 SOP가 푸앵카레 구상에서 $Q_{sig}(S_0, 2\chi, 2\psi)$ 로 표현되고 국부발진기 광신호의 SOP가 $Q_{Lo}(S_0', 2\chi', 2\psi')$ 로 표현될 때 이 두 성분간의 각도는 다음과 같이 주어진다.

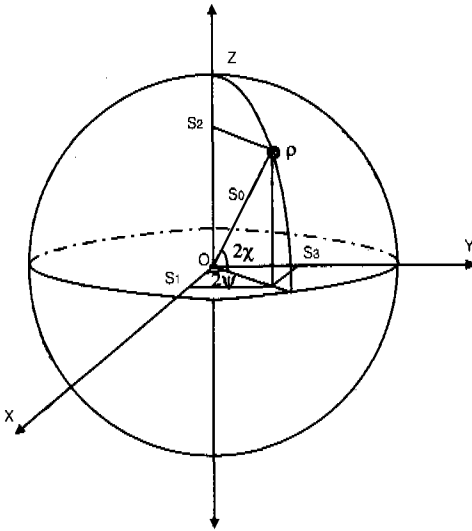


그림 4. 구좌표계 ($S_0, 2\chi, 2\psi$)를 이용한 스투스 파라미터의 표현

$$\gamma = [(2\chi - 2\chi')^2 + (2\psi - 2\psi')^2]^{1/2} \quad (5)$$

따라서 이를 이용하여 식 (3)과 $\alpha = \gamma/2$ 라는 관계[6]로부터 코히어런트 광수신부에서의 수신 파워를 계산할 수 있게 된다.

빛의 편광상태를 행렬을 이용해 나타내는 대표적인 방법으로 존스 행렬과 폴러행렬이 있으나 스투스 벡터와 함께 사용하여 빛의 편광 문제를 분석할 때에는 네 개의 파라미터로 구성된 스투스 벡터에 일치되게 하기 위해 2×2 로 구성된 존스 행렬보다는 4×4 로 구성된 폴러 행렬을 사용한다. 선형 위상 지연기를 사용하여 빛의 SOP를 변화시킬 때 이를 폴러 행렬을 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$[S_0, S_1, S_2, S_3]_{out}^{-1} = M_\beta(\delta)[S_0, S_1, S_2, S_3]_{in}^{-1} \quad (6)$$

여기서 $M_\beta(\delta)$ 은 폴러 행렬이며 β 는 광 위상 지연기가 광축에 대해 틀어진 각도를 의미하고 δ 는 지연기에 의한 위상 지연값을 의미한다. 특히 위상 지연기로 액정을 사용한 경우 $M_\beta(\delta)$ 은 다음과 같이 표현된다^{[15],[17]}.

$$M_\beta(\delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2^2 + S_2^2 \cos \delta & S_2 C_2 (1 - \cos \delta) & S_2 \sin \delta \\ 0 & S_2 C_2 (1 - \cos \delta) & S_2^2 + C_2^2 \cos \delta & -C_2 \sin \delta \\ 0 & -S_2 \sin \delta & C_2 \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서 $C_2 = \cos 2\beta$, $S_2 = \sin 2\beta$ 이다. 따라서 여러 개의 광 위상지연기로 구성된 편광 제어기를 사용하여 빛(특히 국부발진기 광원)의 SOP를 바꿀 경우 식 (6)을 이용해 계산할 수 있다.

IV. 액정 광 위상지연기의 동작원리

광 위상지연을 위해 사용하는 액정은 평행으로 정렬된 네마틱(nematic) 액정을 사용한다. 액정 광 지연기는 액정을 전기적으로 도체이나 빛에 대해서는 투명한 ITO(indium-tin-oxide)로 코팅된 두 개의 유리판 사이에 약 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 두께로 삽입하여 구성한다(그림 5). 외부에서 전압이 인가되었을 때 액정 위상 지연기가 작동하는 과정이 그림 6에 나타나 있다.

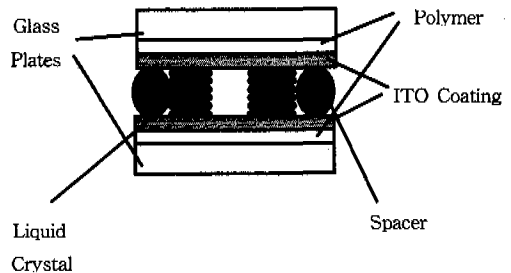


그림 5. 액정 광 위상지연기

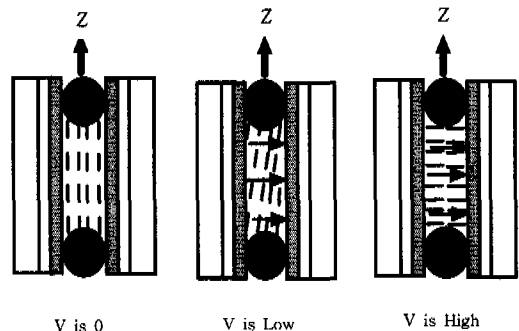


그림 6. 외부 인가 전압에 따른 LC 광 위상지연기의 작동 과정

인가 전압이 액정의 임계전압(액정입자(molecule)가 회전하기 시작하는데 필요한 전압)보다 크게 되어 액정입자가 θ 만큼 회전하면 액정의 이상(extraordinary) 굴절률 n_e 가 $n_e(\theta)$ 로 변하게 된다. 이때 인가 전압에 의한 액정입자 회전각도 θ , θ 에 의한 n_e 의 변화(즉, $n_e(\theta)$)는 다음과 같이 식 (8)과 식 (9)로 표현된다^[18].

$$\theta = \begin{cases} 0 & V \leq V_{th} \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \exp[-(V - V_{th})/V_0] & V > V_{th} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 V는 인가 전압, V_{th}는 액정의 임계전압, V₀는 상수이다.

$$n_e(\theta) = n_o [1 + (n_o^2/n_e^2 - 1) \cos^2 \theta]^{-1/2} \quad (9)$$

인가전압에 따라 액정의 복굴절(n_e(θ)-n_o)값이 변화하게 되며 이때 이로 인한 광 위상지연은 다음과 같이 표현된다^[18].

$$\delta = (2\pi d / \lambda)(n_e(\theta) - n_o) \quad (10)$$

여기서 λ는 빛의 파장, d는 액정층의 두께를 의미한다. 본 연구에서는 먼저 연구의 특성에 적합한 액정으로 BL006 (n_e=1.8160, n_o=1.5300)을 선택하였다. 액정의 임계전압이 2V이며 두께가 10 μm이고 사용하는 빛의 파장이 1550nm일 때 인가전압에 따른 위상지연의 관계가 그림 7에 나타나 있다.

따라서 이 관계를 이용하여 식 (6)과 (7)로부터 액정에 걸어주는 인가전압의 변화에 따른 스투스 파라미터의 변화 즉, 편광의 변화를 이끌어낼 수 있다.

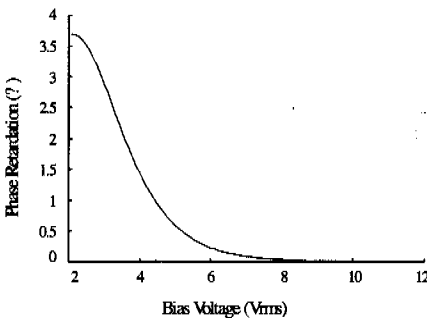


그림 7. 광 위상지연기의 인가전압 대 위상지연간의 관계

V. 무한편광제어의 원리 및 이에 근거한 편광제어 알고리즘

제 II절에서 논한 바와 같이 국부발신 신호의

SOP를 전송신호의 SOP와 일치시키기 위한 여러 가지 방법 가운데 무한 편광제어 방식이 여러 면에서 다른 방법에 비해 장점을 갖고 있다. 본 절에서는 특히 광 위상지연의 수단으로 액정을 사용하는 경우의 무한 편광제어 방식의 원리를 설명하고 이 원리에 입각한 편광제어 알고리즘에 대해 설명하고자 한다. 무한 편광제어를 위한 기존의 방식에서는 임의의 SOP 생성을 위해 두 개 혹은 세 개의 복굴절 변환기를 사용하고 있다. 이론적으로 최대한 세 개의 변환기만 있으면 임의의 SOP에 대해서도 이를 원하는 SOP로 변화하는 것이 가능하다. 이는 뿌앵까레 구상에서 임의의 점을 원하는 임의의 점으로 이동시키는 것을 생각하면 쉽게 이해가 된다. 그러나, 대부분의 복굴절 변환 장치는 그 동작범위에 한계가 있으며 이로 인해 뿌앵까레 구상 특징의 점으로 SOP를 이동시킬 때 세 개의 복굴절 변환기 가운데 하나가 동작 범위 한계에 다다를 가능성이 있다. 이러한 경우 무한(endless) 편광제어가 불가능하게 된다. 또한 편광제어 과정에서 복굴절 변환기가 그 한계에 도달하지 않는 경우라 하더라도 편광추적을 위해 단계(step) 별로 복굴절을 변화시키면서 계속적인 케환(feedback)을 수행해야 하는 무한 편광제어 방식을 위해서는 편광제어 시간을 줄이기 위해 복굴절 변환기의 동작 상태를 항상 가운데 값으로 복원 즉, "reset" 함으로써 연속적으로 변화되어 입력되는 SOP를 보다 빨리 원하는 SOP로 변환해야 할 필요성이 있다.

이와 같은 두 가지 측면에서의 문제는 세 개의 복굴절 변환기에 하나의 변환기를 추가해 네 개를 사용함으로써 해결될 수 있다. 그림 8은 네 개의 액정 광지연기로 구성된 무한 편광제어기의 내부를 나타내고 있다. 특히 복굴절 변환기로 액정을 사용하면 그 동작범위가 다른 장치에 비해 넓어 SOP 변환에 여유가 있으며 동작속도 또한 기존의 광섬유 압착을 위해 모터를 돌리거나 PZT를 변화시키는 데 걸리는 수 sec보다 100배 이상 빠른 수십 msec에 불과한 장점이 있다. 일반적으로 전송신호의 SOP는 수 백 km에 걸쳐 포설된 광케이블에 대해 수 시간 내지는 수 일에 걸쳐 변화하기 때문에^[19] 수 초대의 편광조절 속도라도 충분하지만 광케이블의 유지 보수를 위해 케이블에 의도적인 충격이 가해진 경우 msec 단위의 편광조절이 수반되어야 한다. 따라서 이러한 경우 액정 광지연기로 이루어진 편광제어기를 사용함으로써 그 목적을 달성할 수 있게 된다.

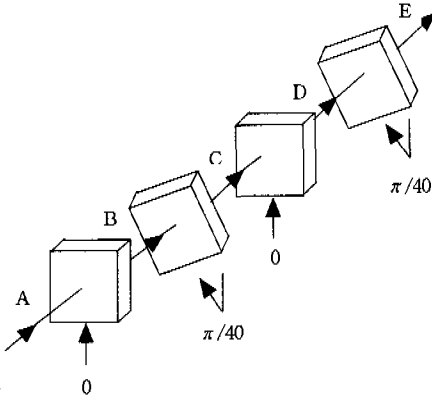


그림 8. 네 개의 액정 광 위상지연기로 이루어진 무한 편광 제어기의 구조

네 개의 액정을 사용한 무한 편광제어의 원리는 뿌앵까레 구를 사용하면 쉽게 이해될 수 있다. 그림 9에서의 같이 수평 및 수직 선형 편광 성분을 각각 H와 V로, +45° 및 -45° 선형 편광 성분을 각각 P와 Q로, 왼쪽 및 오른쪽 원형 편광 성분을 각각 L과 R로 나타내자. 그림 9에서 점선은 네 개의 액정 광지연기를 사용하여 임의의 SOP 점 A를 원하는 SOP 점 E로 변환시켜 나가는 과정을 보여주고 있다. 이는 먼저 그림 8의 첫 번째 광지연기에 의해 구의 HV 축을 회전축으로 해서 점 A를 점 B로 이동시키고 두 번째 광지연기에 의해 PQ 축을 중심으로 C로 이동시키며 세 번째 광지연기에 의해 다시 HV 축을 회전축으로 하여 점 D로, 그리고 마지막으로 네 번째 광지연기에 의해 다시 PQ 축을 중심으로 원하는 SOP 점 E로 이동시키는 것이다. 이와 같이 첫 번째와 세 번째 광지연기는 HV 축을 중심으로 그리고 두 번째와 네 번째 광지연기는 PQ 축을 중심으로 SOP 점을 이동시키기 위해 그림 8에서의 같이 그 배열을 서로 $\pi/4$ 만큼씩 어긋나게 하였다. 본 연구에서는 그림 7과 같은 관계를 나타내는 액정 BL006을 광지연기로 사용하였다. 그림 7에서의 같이 인가전압의 변화에 따른 광위상지연의 최대범위는 3.5π 이상이 된다. 그러나, 안정적인 동작을 보장하기 위해 동작범위를 $\pm\pi$ 로 제한하였고 이는 무한 편광제어를 위해 확보하여야할 광위상지연 범위를 만족시킨다²⁰⁾.

이상에서 설명한 무한 편광제어의 원리에 입각해서 코히어런트 광통신에서 국부발진 신호의 SOP를 전송신호의 SOP와 일치시키는 알고리즘을 개발하였다. 먼저 코히어런트 수신단에서 SOP의 일치를 확

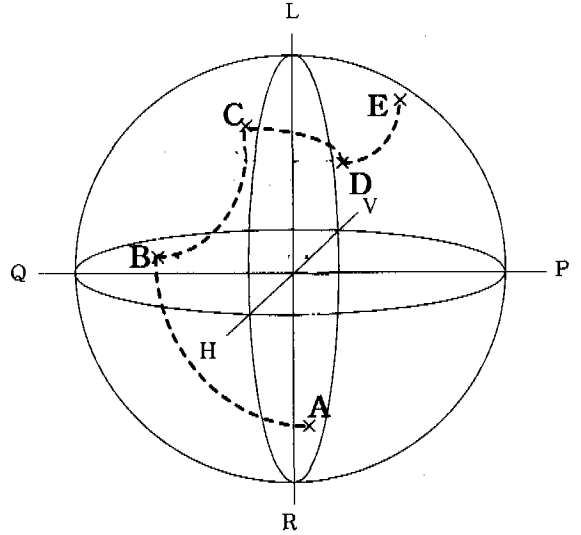


그림 9. 뿌앵까레 구상에서 표현한 편광제어의 과정

인할 수 있는 유일한 정보는 수신 신호의 파워값이다(식 (3) 참조). 따라서 무한 편광제어를 위해서는 이 정보를 이용해서 국부발진 신호의 SOP 값을 변환시켜야 한다. 이에 본 논문에서 소개하는 알고리즘은 수신되는 파워를 이용하여 수신되는 SOP를 보다 빨리 찾는 것이 목표이다.

본 논문에서 제시하는 편광제어 알고리즘의 구성은 다음과 같다. 먼저 임의 광신호의 편광은 타원율 χ 와 편광각 ψ 로 표현된다(그림 4참조). χ 와 ψ 의 각도가 0인 지점의 편광을 기준점으로 정한다면 뿌앵까레 구상의 임의의 점(즉, 임의의 편광)은 두 점간의 각도인 γ 로 표현될 수 있다(식 (5) 참조). 따라서 뿌앵까레 구상의 모든 점은 χ 와 ψ 의 각도가 0인 점을 기준으로 모두 다른 γ 값으로 나타내진다. 이러한 개념을 바탕으로 우리는 먼저 구상의 각 점을 1도 간격으로 설정하여 360×360 개의 편광점 각각과 기준점간의 각도값 γ 를 구한 다음 이를 이용하여 광 파워값을 계산하였다(식 (3) 참조)(단, 이때 수신 광신호 및 국부발진 광신호 각각의 파워값은 미리 알 수 있다는 가정하에). 이와 같은 360×360 개의 파워값 대 타원율 및 편광각 간의 관계를 데이터 베이스로 활용하면 광 파워값만이 유일한 정보인 상황에서 그 빛의 편광 성분인 타원율과 편광각 값을 얻을 수 있게 된다. 하지만 이러한 방법에 의하면 χ 와 ψ 의 각도가 0인 기준점을 중심으로 같은 파워값을 갖는 구상의 점은 그림 10에서 보는 바와 같이 360 개(2차원 원주상 1

도 간격으로 늘어선 점의 개수)가 된다. 그림 10은 뿌앵까레 구를 2차원 단면으로 나타낸 그림이다. 이러한 360개의 점 가운데 단 한 점만이 정확하게 입력된 빛의 편광상태를 표현하는 점이므로 이 점을 찾아내는 것이 관건이다. 또한 이러한 찾기(peak-searching) 작업의 시간을 최소로 하는 것이 매우 중요하다.

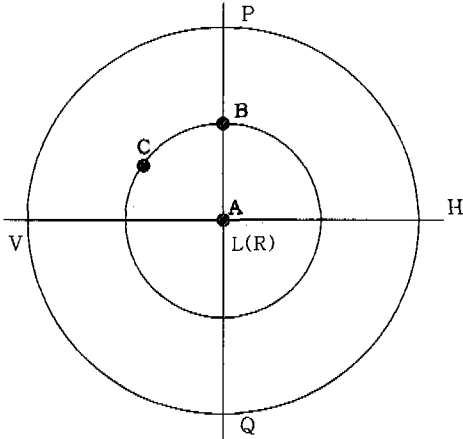


그림 10. 2차원 단면으로 표현한 뿌앵까레 구
(A:기준점, B:변환된 새로운 기준점, C:수신 신호의 편광)

우리는 이를 위해 본격적인 찾기 작업에 앞서 방향설정하기(dithering) 작업을 먼저 수행하였다. 즉, 그림 11에서처럼 뿌앵까레 구를 네 조각을 나누는 후 입력된 빛의 편광점이 구상의 어느 곳에 위치하는가를 모르는 상황에서 비교 기준점 A(χ 와 ψ 의 각도가 0인 점)를 HV 축을 따라 기준점 좌우로 이동시켜보고 PQ축을 따라 상하로 움직여 보면서 검출되는 광파위의 세기를 비교하였다. 그러면 네 가지 파워값 가운데 가장 큰 값을 갖는 쪽의 1/4 구 상에 입력된 빛의 편광점이 존재함을 알 수 있게 된다. 이렇게 함으로써 구 전체를 대상으로 찾기 작업을 하는 수고를 1/4로 줄일 수 있게 되고 이는 편광제어 시스템의 동작 속도 개선을 의미한다. 1/4 구 상에서 정확한 점을 찾아가는 작업은 그림 10의 점 A, B, C의 예를 이용해 설명하고자 한다. 이 예에서는 방향설정 작업 결과, 편광점 찾기 작업 대상의 구는 평면상 2사분면에 위치함을 알 수 있다. 이 경우, B점을 새로운 기준점으로 설정하고 이 기준점에서부터 C점으로 다가가면서(즉, χ 와 ψ 의 각도를 변화시키면서) 광파위를 비교해 나간다. 이 과정에서 최대의 광파위를 얻게 되면 바로 그 점이 수

신된 빛의 정확한 편광점임을 의미한다.

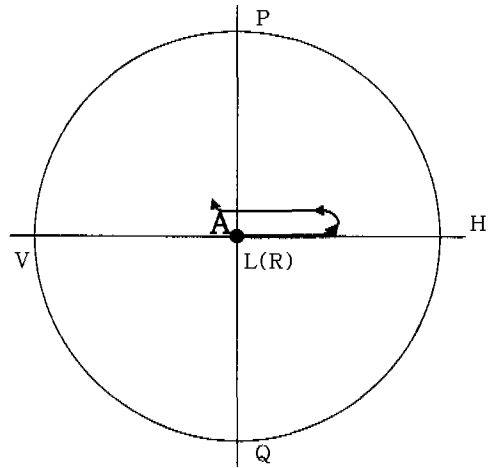


그림 11. 방향설정 작업 과정 (dithering)

이상에서 설명한 알고리즘의 특징은 국부발진 신호의 편광상태를 수신 신호의 편광상태에 일치하게 편광을 제어하는 과정에서 방향 설정작업(dithering) 이외에는 직접적으로 편광제어기를 동작시키지 않는다는 것이다. 이에 반해 기존의 케환 알고리즘에서는 정확한 편광 상태 값을 알 때까지 케환을 통해 반복적으로 편광제어기를 동작시킨다. 편광제어기의 동작 횟수가 적다는 것은 그만큼 전체 제어시스템의 동작속도가 빠르다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서 제안하는 편광제어 방식은 광 위상지연기를 사용하는 물질(액정)의 우월한 특성과 빠른 제어 알고리즘 측면에서 기존의 무한편광제어 방식에 비해 상당히 개선된 방식임을 알 수 있다.

VI. 실험

그림 12는 본 연구에서 제안한 새로운 제어알고리즘을 적용한 무한 편광제어방식의 동작을 입증하기 위해 구성한 시스템의 장치도이다.

전송신호 광원으로는 $\lambda = 1554.48\text{nm}$ 의 DFB-LD를 사용하였으며 파워레벨은 0.01mW로 맞추었다. 국부발진 신호의 광원으로는 파장가변 레이저(New Focus)를 사용하였으며 파장은 비팅 신호의 주파수가 약 2GHz가 되도록 파장을 가변시켰다. 전송신호의 편광은 수동 편광조정기(manual-polarization controller)를 통해 임의의 값으로 변환하였으며 국

부발진 신호의 편광은 액정 광위상 지연기로 구성된 편광제어기를 통해 변환되었다. 커플러를 통해 합쳐진 전송신호와 국부발진 신호는 23GHz 고속 광검출기를 통해 검출되었고 검출된 비팅 신호는 증폭기를 거쳐 RF 스펙트럼 분석기로 입력되었다. 이때 광검출기의 유한한 대역폭 특성상 전송신호와 국부발진신호는 자동으로 필터링되고 비팅신호만이 스펙트럼 분석기에 나타난다.

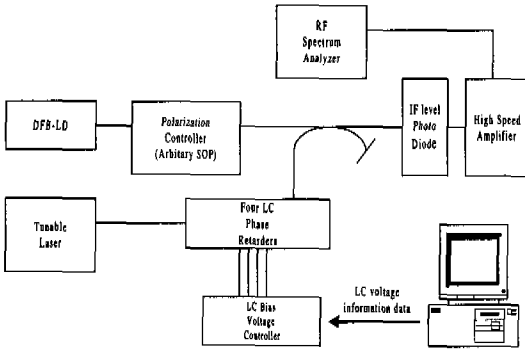


그림 12. 무한 편광제어 시스템 실험 장치도

본 연구에서 개발한 제어 알고리즘의 동작 입증 을 위해 먼저 수동 편광조절기를 이용하여 전송신 호의 편광을 고의로 제어하여 complete fading 현상 이 발생하게 하였다(그림 13). 다음으로는 제 V절에 서 설명한 방향설정(dithering) 작업을 위해 네 번에 걸쳐 원하는 타원율과 편광각에 해당하는 액정인가 전압을 계산한 후 각각을 따로 네 개의 액정 광지 연기에 인가하였다. dithering 작업결과 전송신호 편 광점의 위치를 뿌앵까레 전체 구를 대상으로 찾지 않고 1/4구를 대상으로 찾을 수 있게 되었다.

다음은 이를 바탕으로 제 V절에서 설명한 편광제 어 알고리즘에 의해 컴퓨터를 실행시켜 전송신호의 편광상태에 해당하는 액정 인가 전압값을 알아냈다. 그리고 이 값을 액정 인가전압 제어기를 통해 네 개의 액정 광 위상 지연기에 전압을 인가한 결과, 최대의 비팅 신호를 검출할 수 있었다(그림 14).

이렇게 함으로써 본 연구에서 새롭게 제안한 편 광제어 알고리즘의 동작을 입증할 수 있었다. 그림 15는 새로이 제안한 알고리즘을 이용하여 개발한 프로그램의 실행화면을 나타낸다. 사용자 친화 접속 (user friendly interface) 환경을 위해 윈도우 상에 서 작동하도록 프로그램을 개발하였다. 화면의 위 부분은 입력 전송신호의 파워에 대한 타원율 및 편

광각에 대한 정보를 얻는 내용이다. 화면의 아래 부 분은 입력 전송신호의 파워에 국부발진신호의 파워 를 일치시키기 위해 즉, 국부발진신호의 편광을 바 꾸주기 위해 편광제어기에 인가하여야할 전압값을 얻는 내용이다. 이러한 전압값을 얻는데 걸린 시간 은 300MHz 펜타움 II 컴퓨터를 이용한 경우 CPU 작동시간을 고려했을 때 수십 nsec에 불과했다.

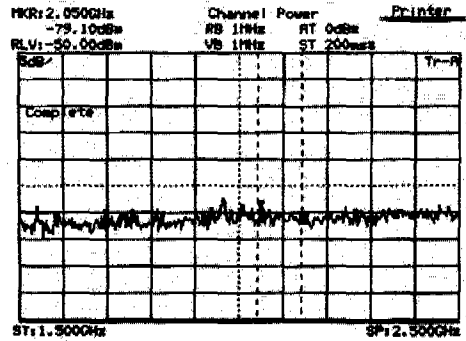


그림 13. RF 스펙트럼 분석기를 통해 검출된 신호편광제 어가 이루어지지 않아 기저대역 신호가 전혀 검 출되지 않은 경우 (complete fading)

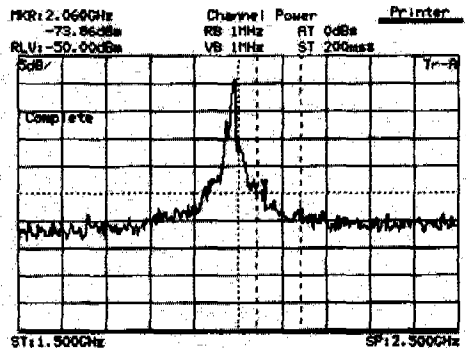


그림 14. 무한 편광제어가 이루어져 기저대역 신호가 최 대로 검출된 경우

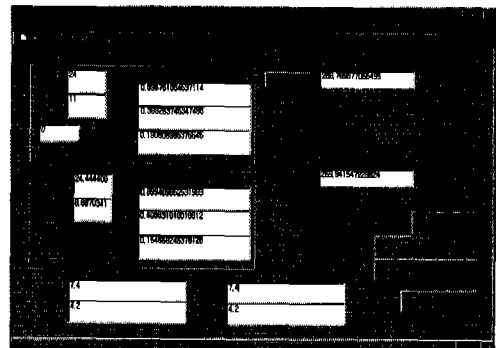


그림 15. 편광제어 프로그램 실행 화면

VII. 결 론

코히어런트 광통신을 위해 해결해야 할 핵심기술 가운데 하나는 수신단에서 전송신호의 편광과 국부 발진 신호의 편광을 일치시키는 것이다. 본 논문에서는 이를 위한 여러 가지 방법 가운데 무한편광제어 방식을 선택함에 있어 기존의 방식과는 다르게 광 위상지연을 위한 수단으로 액정을 사용하였으며 특히 액정을 통한 편광제어를 위해 초고속의 새로운 제어 알고리즘을 개발하였고 개발한 알고리즘의 동작을 입증하기 위해 코히어런트 광통신 시스템을 구성하여 실험을 수행하였다. 실험 수행 결과 알고리즘의 성공적인 동작을 확인할 수 있었으며 액정 고유의 인가전압에 대한 반응속도와 컴퓨터의 CPU 속도를 감안했을 때 본 연구에서 개발한 무한 편광 제어시스템의 동작속도는 수십 msec에 불과함을 유추할 수 있었다. 이는 본 논문에서 제안하는 편광제어기의 동작속도가 기존 편광제어기의 동작속도보다 100배 이상 빠름을 의미한다. 본 실험에서는 알고리즘에 입각한 프로그램을 수행하는 것과 액정 편광 제어기에 전압을 인가하는 과정이 서로 분리되어 있어 수동으로 전압정보를 입력하였으나 향후 이러한 작업을 자동으로 수행하게 하는 편광제어 시스템을 개발함으로써 이 제어기의 상품화 가능성에 대한 연구를 계속할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] S.Betti, et al., "Coherent Optical Communications Systems", John Wiley & Sons Inc. New York, Chapter 1, 1995.
 [2] G. De Marchis, et al, "Nonlinear limitations in ultra high capacity long-distance transmission links," *ECOC '93, Montreux, Switzerland*, WE 17, pp. 12-16, Sept 1993.
 [3] R. Olshanky, V. A. Lanzisera, S. F. Su, R. Gross, A. M. Forcucci, and A. H. Oaks, "Subcarrier multiplexed broadband service network: A flexible platform for broad-band subcarrier services," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, LT-11(1), pp.60-69, 1993.
 [4] G. De Marchis, E. Iannone, F. Renzi, and M. Todaro, "A new protocol for high performance

fiber optics star network based on FDM technique," *J. of Optical Communication*, Vol.14, pp5-12, 1993.

[5] N. G. Walker and G. R. Walker, "Endless polarization control using four fiber squeeze-squeezers," *Electron. Lett.*, Vol. 22, no.6, 1987.
 [6] P.E. Green, Jr., "Fiber Optic Net works", Prentice Hall, Englewood Cliffs, Chapter. 8, 1993.
 [7] M. Johnson, "In-line fiber-optical polarization transformer," *Appl. Opto.*, Vol. 18, no. 9, p.1288, 1979.
 [8] T. Matsumoto and H. Kano, "Endlessly rotatable fractional-wave devices for single-mode-fibre ptics," *Electron. Lett.*, Vol. 22, no. 2, p.78, 1986.
 [9] Y. Kidoh, Y. Suematsu, and K. Furuya, "Polarization control on output of singlemode optical fibers," *IEEE J. of Quantum Electron.*, QE-17(6), pp. 991- 994, 1981.
 [10] T. Okoshi, Y. H. Cheng, and K. Kikuchi, "New polarization control scheme for optical heterodyne receiver using two Faraday rotators," *Electron. Lett.*, Vol. 21, no. 18, pp.787-788, 1985.
 [11] T. Imai, K. Nosu, and H. Yamaguchi, "Optical polarization control utilizing optical an heterodyne detection scheme," *Electron. Lett.*, Vol. 21, no. 2, pp. 52-53, 1985.
 [12] R. Noe, H. Heidrich, and D. Hoffman, "Automatic endless polarizati control with integrated-optical Ti:LiNbO₃ polarization transformers," *Opt. Lett.*, Vol. 13, no. 6, p.527, 1988.
 [13] N. G. Walker and G. R. Walker, and J. Davidson, "Endless polarization control using an integrated optic lithium niobate device," *Electron. Lett.*, Vol. 24, no. 5, p.266, 1988.
 [14] M. Johnson, "poincaré sphere representation of birefringent networks," *Applied Optics*, Vol. 20, no. 12, pp.2075-2080, 1981.
 [15] W. Shurcliff, "Polarized Light: production

and use", Harvard University Press, Cambridge, Chapter 8, 1962.

- [16] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon press, Oxford, Chapter 1, 1980.
- [17] D. C. Fair and M. Tilton, "Application of the Mueller matrix method to optically retarded liquid crystal cells for C.I.E. color coordinate calculations," *IEEE International Display Research Conference, San Diego*, 15-17, pp.60-63, Oct 1991.
- [18] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, "Fundamentals of Photonics", John Wiley & Sons, Inc., New york, Chapter 18, 1991.
- [19] A. Simon and R. Ulrich, "Evolution of polarization along a single-mode fiber," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 31, no. 8, pp. 517-520, 1977.
- [20] N. G. Walker and G. R. Walker, "Polarization control for coherent communications," *J. of Lightwave Tech.*, LT-8(3), pp.438-458, 1990.

이 주 활(Joo-Whal Lee)

비회원

1998년 2월 : 명지대학교 공과대학 전기전자공학부 졸업(공학사)

1999년 3월 ~ 현재 : 아주대학교 컴퓨터 공학부 재학중

신 서 용(Seoyong Shin)

정회원



1987년 2월 : 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업 (공학사)

1989년 8월 : Florida Tech. Electrical Eng.(공학석사)

1992년 12월:Texas A&M Univ. Electrical Eng. (공학박사)

1993년 2월~1994년 8월 : 한국전자통신연구원 선임연구원

1994년 9월~현재 :명지대학교 전자정보통신공학부 부교수

김 수 환(Soo-Whan Kim)

비회원

1996년 2월 : 명지대학교 공과대학 정보통신 공학과 졸업 (공학사)

1998년 2월 : 명지대학교 공과대학. 정보통신 공학과 (공학석사.)