

편광모드분산 보상을 위한 세 점 측정 방식의 빛의 편광상태 추적 알고리즘

준회원 송 홍 석*, 정 현 수*, 종신회원 신 서 용*

State Of Polarization Tracking Algorithm using Three-Point Measurement Technique for Polarization Mode Dispersion Compensation

Hong-suk Song*, Hyun-soo Jung* Associate Members Seoyong Shin* Life Members

요 약

본 논문에서는 최근 장거리 초고속 광통신 시스템에 있어서 해결해야 할 문제로 대두되고 있는 편광모드분산(PMD) 보상 시스템에 적용할 수 있는 새로운 방식의 편광상태(SOP) 추적 알고리즘에 대해 소개하였다. 새로운 SOP 추적 알고리즘은 본 연구팀에서 기존에 발표한 SOP 추적 알고리즘과 마찬가지로 헤테로다인 코히어런트 수신 방식을 근거로 하고 있으나 기존의 방법과는 달리 수시로 변하는 입력 신호의 SOP에 관계없이 항상 단 세 번만의 측정을 필요로 하기 때문에 동작 시간이 항상 일정하며 속도가 매우 빠른 장점이 있다. 이러한 특성은 매우 안정적이고 빠른 SOP 추적을 요하는 PMD 보상 시스템에 효과적으로 적용될 수 있다.

ABSTRACT

As speed and capacity of optical communication system increase dramatically, polarization-mode-dispersion compensation(PMDC) becomes a hot issue in these days. In this paper, we introduce a new state-of-polarization (SOP) tracking algorithm that can be used in a PMDC system. The new SOP tracking algorithm is also based on optical heterodyne coherent detection technique like the previous algorithm that we have reported before. However, unlike the previous algorithm, the new algorithm requires only three times of measurement in any circumstances to find the exact SOP information so that it can effectively be applied to PMDC system where very fast and stable operation is indispensable.

I. 서 론

현재 세계는 개방화, 국제화의 물결을 타고 급속히 정보화 사회로 접어들고 있다. 정보화 사회에서 음성, 데이터, 사진, 그리고 동영상 등의 정보유통 요구량은 상상을 초월하여 급속히 증가하고 있으며 이를 수용하기 위한 네트워크의 기반구조(Infrastructure)로 세계 각 국은 광통신망의 근간으로 하는 초고속 광대역 종합정보통신망의 구축에 많은 연구인력과 비용을 투자하고 있다. 이 가운데 광섬유 선로

를 통해 구축되는 광통신망은 그 규모에 따라 소규모 지역망(LAN), 간선망, 기간망으로 구분되고 국가내 혹은 국가간의 정보 전송에 있어 가장 큰 역할을 수행할 것으로 기대된다. 이러한 광통신 시스템의 용량과 규모는 더욱더 증가하는 추세이고, 최근 10Gbps 이상의 초고속 광통신 시스템에 있어서는 이전에 등한시되어 왔던 광의 무작위적인(Random) 편광 특성이 부각되기 시작하였고, 이러한 광의 편광 특성으로 인해 전송상에서 야기되는 가장 큰 문제 가운데 하나는 광섬유의 복굴절 변화

* 명지대학교 정보통신공학과 광통신 연구실 (dolbol@mju.ac.kr, sshin@mju.ac.kr)

논문번호: 010403-1220, 접수일자: 2001년 12월 20일

※ 본 연구는 정보통신부에서 지원하는 대학기초연구지원사업으로 수행된 것임. 본 연구의 일부는 광주과학기술원 초고속 광네트워크 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의한 것임.

표 1. 전송거리에 따른 PMD.

| Maximum PMD for Digital Transmission | | |
|--------------------------------------|--------------------|---|
| Bit Rate (Gbits/sec) | Maximum PMD (psec) | PMD Coefficient (psec/Km ^{1/2}) |
| 2.5 | 40 | < 2 |
| 10 | 10 | < 0.5 |
| 40 | 2.5 | < 0.125 |

에 의해 발생하는 광 펄스의 편광모드분산(Polarization Mode Dispersion)이다. 표 1은 데이터 전송 속도와 전송 거리에 따른 PMD 허용정도를 나타내고 있다²⁾. 이 표에서 보는 것처럼 현재 육상 전송 시스템용으로 포설되어 있는 대부분의 오래된 광섬유의 DGD값이 약 2psec/km^{1/2}임을 고려 할 때 10Gbps 이상의 데이터 전송시 높은 PMD값을 갖게 되고 또한 높은 PMD값을 갖는 광섬유의 경우, 시간에 대한 순간적인 DGD값이 계속해서 변화하게 되어 이로 인해 PMD값이 불과 수 백 km 전송임에도 불구하고 100psec 이상이 되어 10Gb/s 전송 시스템의 경우, 아이(eye) 다이어그램의 아이가 완전히 닫히는 결과를 초래하게 된다. 이러한 상황임에도 불구하고 PMD 보상에 대한 연구는 아직 광통신의 다른 분야에 비해 성숙되지 않아 전 세계적으로도 PMD를 보상하는 확실한 방법이 아직까지 개발되지 않고 있다. 지금까지 PMD 보상을 위한 여러 방안이 발표되어 오고 있으나 공통적으로 갖고 있는 문제점은 보상이 실시간 단위에서 이루어지지 않고 있다는 것이다. 데이터의 속도가 10Gb/s 이상으로 증가함에 따라 보상 시간이 수 초대에 이르는 기존의 방법에 의해 PMD를 보상할 경우, 상당히 많은 양의 데이터 손실을 감수할 수밖에 없다. 본 논문에서는 본 연구팀에서 이미 발표한 SOP 추적 알고리즘을 보다 개선하여 어떠한 조건하에서도 항상 단 세 번만의 측정을 통해 SOP 정보를 얻어 낼 수 있는 새로운 알고리즘을 소개하고자 한다.

II절에서는 본 논문에서 제안하는 편광제어 알고리즘을 채용한 편광모드분산 보상 시스템을 소개하며, III절에서는 새로이 제안하는 알고리즘의 동작 원리에 대해 설명하고, IV절에서는 새로운 알고리즘의 동작을 증명하는 실험 및 결과에 대해 논하며, 마지막으로 V절에서 결론을 실었다.

II. 새로운 SOP 추적 알고리즘을 채용한 PMD 보상 시스템

최근에 발표된 PMD보상 방법으로는 위상 다양화 검출방법(Phase Diversity Detection)³⁾, 자동 PMD보상 방법(Automatic PMD Compensation)⁴⁾, 편광 스크램블러(Polarization Scrambler)와 편광 분석기(Polarimeter)를 이용하여⁵⁾ 편광모드분산을 보상하는 방법 등이 있다. 위상 다양화 검출방법은 편광모드분산이 발생된 신호가 편광빔 분리기(PBS: Polarized Beam Splitter)를 통해 두 개의 PSP 성분으로 분리한 후, PMD보상을 위한 정보를 DC 전압값으로 추출하여 광 지연선을 모터로 구동시켜 PMD를 보상하는 방법으로, 이러한 방법의 경우 DC 전압값과 두 PSP 성분간의 위상 지연시간과의 관계가 완전하지 못하고 광 지연선을 제어하는 스텝 모터의 동작 속도 한계로 인해 실시간으로 PMD가 보상되기 어려우며, PMD보상 두 PSP성분을 후 재결합 할 때 두 신호간의 동기화의 어려움이 따른다는 단점이 있다. 다음으로 자동 PMD 보상 방법(Automatic PMD Compensation)을 살펴보면, 수신단에서 QWP(Quarter Wavelength Plate)와 HWP(Half Wavelength Plate)를 각각 0° 부터 180° 까지 회전시키며 변조속도에 해당하는(NRZ) 주파수 성분으로부터 최적의 PMD보상을 위한 편광상태를 파악하여 QWP와 HWP를 이용하여 수신된 신호의 편광상태를 제어한 후, PMF의 slow axis와 fast axis의 차이에 의한 지연으로 PMD를 보상하는 방법이다. 이러한 방법의 경우 전송선에서 발생하는 PMD는 시간에 따라 수시로 변하므로 항상 일정한 지연을 발생시키는 PMF만으로는 완벽하게 PMD를 보상할 수 없고, 능동적인 PMD보상을 위해서 매번 입력되는 빛에 대해 QWP와 HWP를 각각 0° 부터 180° 까지 회전시켜야 한다는 번거로움이 따른다. 또한 QWP와 HWP의 회전은 스텝 모터로 하게 되는데 이의 동작시간이 실시간으로 이루어지기 어렵다. 편광 스크램블러와 편광 분석기를 이용하여 PMD를 보상하는 방법은 우선 편광 스크램블러를 이용하여 광 신호의 모든 편광 상태에 따른 PMD 요소를 파악을 한 후, 편광 분석기와 DGD 보상기를 이용하여 PMD를 보상하는 방식이다. 이러한 방식은 Feed-Forward 방식으로 PMD를 보상하는 시간은 단축 시켰지만 고가의 편광 스크램블러와 편광 분석기를 사용해야 한다는 단점이 있다.

이상과 같은 세계적인 관련 연구 동향을 분석한 결과, 현재 무엇보다도 시급한 것은 실제적인 광 시스템에 적용 할 수 있는 실시간으로 동작하는 PMD 보상기의 개발이라는 점을 알 수 있었고, 이를 위해

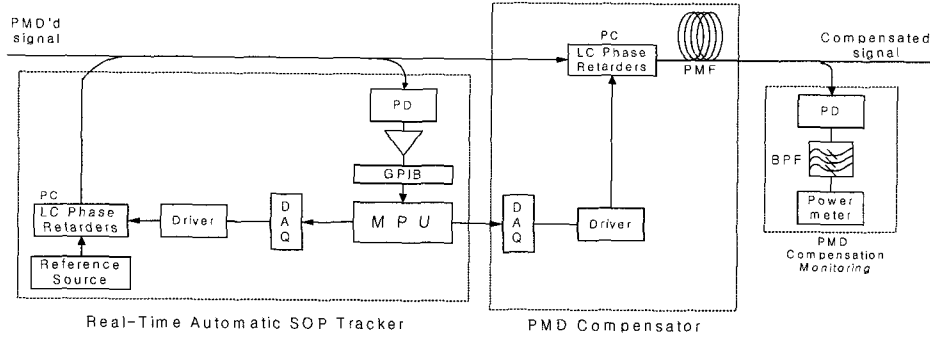


그림 1. 새롭게 제안하는 실시간 PMD 보상 방식.

서는 PMD 보상시스템에 적용시켜 실시간으로 효과적으로 빛의 편광을 제어할 수 있는 SOP 추적 알고리즘이 필수적이다. 그림 1은 본 연구팀에서 제안하는 실시간 자동 PMD 보상 시스템 개략도이다^[1]. 그림에서 보는 바와 같이 제안하는 PMD 보상 장치는 수신기로 입력되는 빛의 SOP를 파악하기 위한 실시간 자동 편광 추적부와 파악된 빛의 SOP를 바탕으로 PMD를 보상하는 PMD 보상부로 나뉜다. 우선 실시간 자동 편광 추적부를 살펴보면, 자동 편광 추적부의 역할은 입력된 빛의 SOP를 파악하는 것이다. PMD 보상부에서 정확한 PMD 보상을 이루기 위해서는 입력 빛의 정확한 SOP 정보를 필요로 한다. 따라서 자동 편광 제어부의 동작 원리는 제어기 내에 기준 광을 내재시키고 기준 광의 SOP가 입력 광의 SOP와 일치되도록 제어해 주는 것이다. 기준 광의 SOP가 입력 광의 SOP와 일치되었는지의 여부는 식(1)과 같은 관계를 통해 판단할 수 있다.

$$P_{Total} = P_{Sig} + P_{Ref} + 2\sqrt{P_{Sig} P_{Ref}} \cos \alpha \quad (1)$$

$$* \cos(\omega_{IF}t + \phi_{Sig} - \phi_{Ref})$$

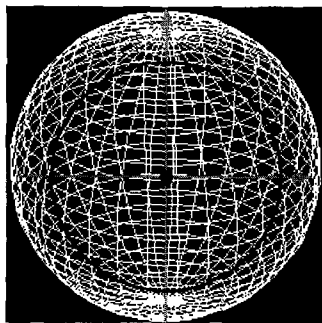
즉, 두 빛의 SOP가 일치되면 두 빛간의 편광 차이를 의미하는 α 값이 0이 되어 식(1)의 세 번째 항(두 빛의 맥놀이 성분)이 최대가 되면서 P_{Total} 값이 최대가 된다. 식(1)에서 ω_{IF} 는 두 빛의 맥놀이 주파수 성분을 의미한다. 이러한 관계를 이용하여 기준 광의 SOP를 변화시키면서 두 빛의 맥놀이 성분이 최대가 될 때까지 제환(Feedback)을 반복한다. 빛의 SOP는 뿔앵까레 구상의 한 점으로 표현되는데, 문제는 식(1)의 맥놀이 성분을 최대화하기 위해 뿔앵까레 구상의 모든 점에 대해 조사를 할 수는 없다는 데에 있다. 따라서 개발하는 자동 편광제어

기가 실시간으로 동작할 수 있는지 없는지의 여부는 최단 시간 내에 입력 광의 SOP와 일치하는 점으로 기준 광의 SOP를 이동할 수 있는지에 달려 있다. 다음으로 PMD 보상부(PMD Compensator)에 대해서 살펴보면 PMD 보상부는 PMD를 실제적으로 보상해주는 부분으로서 편광제어기와 PMF(Polarization Maintaining Fiber)로 구성되어 있다. PMF의 복굴절(Birefringence) 파라미터값과 길이는 시스템에서 발생하는 PMD값을 예상하여 결정한다. 수시로 변하는 PMD값을 항상 정확하게 보상할 수는 없지만, Power Penalty를 1dB 이하로 유지하며 1Bit Duration 이내의 PMD를 보상할 수 있도록 PMF의 파라미터와 길이를 결정한다. PMF의 slow-axis와 fast-axis에 의한 군속도 지연을 전송상에서 발생하는 PMD와 반대 방향으로 정렬해 줌으로써 두 편광 성분간의 위상차를 최소화시키고 이러한 결과로 PMD를 보상하게 된다. 자동 PMD 방법^[4]에서는 수신기로 입력되는 빛의 SOP에 대한 정보가 없이 PMD 모니터부에서 Monitoring Map을 작성하여 이를 토대로 빛의 편광을 제어하고 있다. 그러나, 이 방법의 경우, 항상 변화된 값으로 입력되는 빛에 대해 이러한 Monitoring Map을 매번 새롭게 작성해야 하는 번거로움이 있으며 이로 인해 보상 시간이 상당히 증가하게 되는 문제점이 있다. 이러한 문제점은 PMD를 보상하는 방식이 Feedback 방식을 근간으로 하기 때문이다. 즉, PMD가 발생된 신호를 포착하여 그것을 바탕으로 개선해 나가는 방식이기 때문에 시간을 요하게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해, Feedback이 아닌, Feed-forward 방식에 의해 PMD를 보상하고자 하는 것이다. 이러한 Feed-forward 방식은 PMF의 Eigenstate에 맞는 빛의 SOP를 알아내기 위해 수시로 변하는 수 많은 데이터에 의존

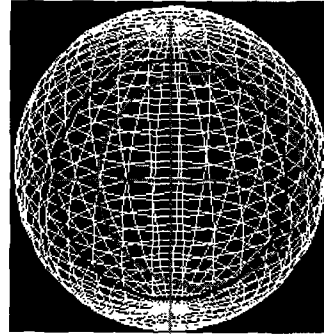
하지 않고, 입력되는 빛의 SOP를 직접적으로 알아냄으로써 PMD보상을 위한 시간의 소비를 축소시킬 수 있다. 본 논문에서는 어떠한 상황에서도 단 세 번의 맥놀이 신호의 측정만으로 입력 빛의 SOP를 알아낼 수 있는 편광제어 알고리즘을 제안하였다.

III. 새로이 제안하는 편광제어 알고리즘

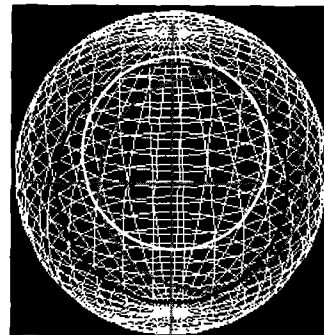
본 논문에서 새로이 제안하는 세 점 측정 방식의 SOP추적 알고리즘은 본 연구팀이 개발한 적게는 수 차례에서 많게는 수십 차례 궤환을 해야만 하는 기존의 실시간 편광제어 방식^[1]의 알고리즘을 개선하여, 수신 신호의 SOP 위치에 상관없이 단 세 번의 궤환만으로 수신 신호의 SOP를 파악할 수 있게 하는 매우 간단한 방식으로 이 방식에 의하면 보다 더 빠르면서도 항상 일정한 시간 내에 수신 신호의 SOP를 파악할 수가 있다. 그림 2는 새로이 제안하는 세 점 측정 방식의 알고리즘의 동작 과정을 푸앵카레구(Poincare Sphere)에서 설명하는 것이다. 그림 2의 (a)는 최초 수신된 신호와 기준 광 신호의 편광 불일치에 의한 맥놀이 파위에 의해 360개의 SOP점이 설정된 상태이다. 이때 360개의 SOP점은 푸앵카레구를 2차원 평면으로 고려를 했을 때 원으로 표시가 된다. 그림 2의 (b)는 두 번째 360개의 SOP점을 찾기 위해서 기준광 신호의 SOP점을 푸앵카레구 상 임의의 점(이 그림에서는 오른쪽)으로 이동시킨 후 수신된 신호와의 맥놀이 파위에 의해 새로이 발생하는 360개의 점을 보여주고 있다. 수신 신호의 SOP점은 기준광 신호의 SOP를 이동시킨다 하여도 그 상태가 변하는 것이 아니므로 수신 신호의 SOP점은 (a)와 (b) 각각 360개의 SOP점 가운데 반드시 한 점에 해당하게 된다. 즉, 그림 2의 (b)에서 보는 바와 같이 두 원이 만나는 두 점 중에서 한 점이 바로 수신된 신호의 SOP를



(a)



(b)



(c)

그림 2. 알고리즘 동작과정.

의미한다. 이 둘 중의 하나를 결정하기 위해 기준광의 SOP를 한번더 임의의 점(이 그림에서는 위쪽으로)으로 이동하여 새로운 360개의 점을 검출하게 되면, 그림 2의 (c)에서 보여지듯이 첫 번째와 두 번째에서 검출된 360개의 SOP점과 세 번째 측정에서 검출된 360개의 SOP점은 푸앵카레구 상의 단 한 점에서만 만나게 되고 바로 이 점이 수신된 신호의 SOP를 의미하게 된다. 그림 3은 새로이 제안하는 알고리즘의 동작 순서도이고, 그림 4는 알고리즘 순서도에 의거해서 전체적인 알고리즘을 동작시키는 알고리즘 동작 프로그램이다. 그림 3에서 보는 것처럼 맥놀이 파위와 기준광 신호의 SOP 정보는 직접 작성한 컴퓨터 프로그램에 의해 분석이 된다. 그림 4는 알고리즘의 동작 순서를 전체적으로 제어하는 컴퓨터 응용 프로그램이고, 그림에서 보는 것처럼 새로이 제안하는 세 점 측정 방식의 알고리즘이 동작한 후, 세 원이 푸앵카레구의 한 점에서 만나는 것을 볼 수가 있다. 세 원이 한 점에서 만나는 SOP점이 최종적으로 찾고자 하는 입력 광 신호의 SOP점임을 알 수가 있다. 이상에서 설명한 것처럼

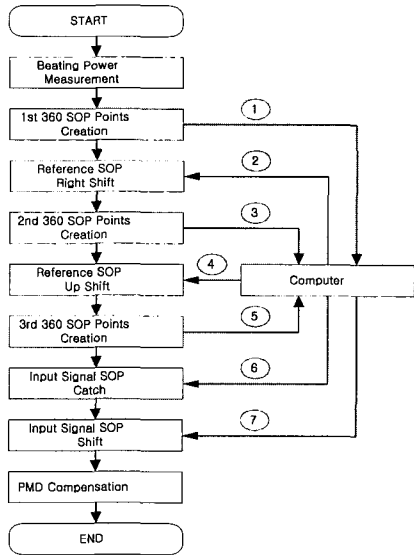


그림 3. 알고리즘 동작 순서도

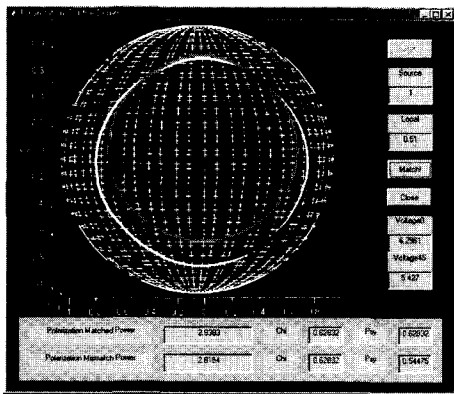


그림 4. 알고리즘 동작 프로그램.

새로이 제안하는 세 점 측정 방식의 SOP 추적 알고리즘은 단 세 번의 맥놀이 파워 측정을 필요로 하고 동작이 매우 간단하므로 기존의 편광제어 방식에 비해 동작 속도가 매우 빠르다.

V. 실험

본 논문에서 제안하는 알고리즘을 입증하기 위한 실험 장치는 그림 5와 같고, 시스템에 사용한 편광 제어기는 네마틱(Nematic) 액정(LC) 편광제어기를 사용하였다. 먼저 기준신호의 SOP를 스톱스 파라미터 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]$ 이 되게 한 후, 피드백 된 맥놀이 파워를 측정하여 $\cos(\gamma/2)$ 를 알아낸 후 360개의 SOP 점을 도출 할 수 있었다. 첫 번째 360개의 SOP점

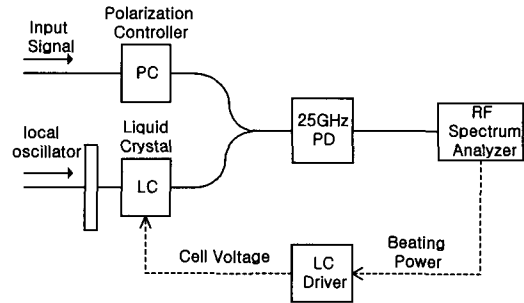
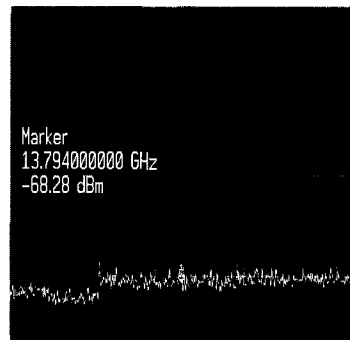
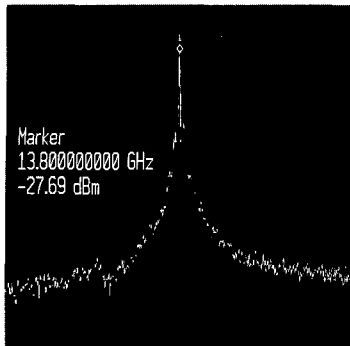


그림 5. 새로운 편광추적 방식 실험 장치.

을 도출한 후, LC의 인가전압을 조정하여 기준신호의 SOP를 푸앵카레구의 오른쪽으로 옮긴 후 두 번째 360개의 SOP 점을 도출 할 수 있었다. 이때 첫 번째 검출한 360개의 SOP 점과 두 번째 검출한 360개의 SOP점은 각각 푸앵카레 구 상에서 원으로 표시가 되고 두 원이 두 점에서 만나게 되고 만나는 두 점중에서 하나의 점이 찾고자 하는 입력광 신호의 SOP점임을 알 수가 있다. 이 두 점 중에서 정확하게 입력광 신호의 SOP를 선택을 하기 위해서 위쪽으로 기준광 신호의 SOP를 이동시킨 후, 맥놀이 파워를 측정하여 세 번째 360개의 SOP점을 도출하면 이전에 도출한 두 개의 360개의 SOP점의 집합과 마지막으로 도출한 360개의 SOP점의 집합으로부터 공통으로 존재하는 단 하나의 SOP점을 도출하였다. 그림 6의 (a)는 기준신호의 SOP가 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]$ 일때 수신 신호와의 편광 불일치로 인해 맥놀이 파워가 검출되지 않은 상태이고, 그림 6의 (b)는 제안하는 알고리즘을 적용한 결과 기준신호와 수신 신호의 SOP가 일치되어 얻어진 맥놀이 파워의 모습을 보여주고 있다. 이는 제안하는 알고리즘을 사용하여 맥놀이 파워의 손실을 보상했음을 의미하며 이는 동시에 수신된 신호의 SOP를 추적하



(a)



(b)

그림 6. 측정된 맥놀이 파워.

여 알아내었음을 의미한다. 이러한 새로운 알고리즘에 의해 얻어진 결과를 기존에 본 연구팀에서 개발한 방식^[1]에 의한 결과와 비교하여 보면 두 결과에서 기준신호와 수신된 신호의 SOP가 일치되었을 때 맥놀이 신호의 크기에서 약간의 차이를 발견할 수 있었는데 이는 실험에서 사용한 레이저의 SOP가 피크테일(pig-tail)된 광 파이버의 영향을 극심하게 받아, 실험 환경이 변함으로 인해 기인한 것으로 사료된다.

VI. 결론

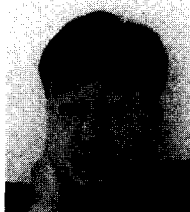
날로 확장되는 정보 통신 서비스 용량을 충족 시켜 주기 위해서 데이터 용량은 계속 증가하는 추세이다. 연구의 배경 및 필요성에서 언급한 바와 마찬가지로 PMD는 대체로 40Gb/s 이상의 전송 시스템에서 전송신호의 품질을 획기적으로 악화시키는 요인이다. 이러한 상황임에도 불구하고 PMD 보상에 대한 연구는 아직 광통신의 다른 분야에 비해 성숙되지 않아 전 세계적으로도 PMD를 보상하는 확실한 방법이 아직까지 개발되지 않고 있다. 지금까지 PMD 보상을 위한 여러 방안이 발표되어 오고 있으나 하나같이 공통적으로 갖고 있는 문제점은 보상이 실시간 단위에서 이루어지지 않고 있다는 것이다. 데이터의 속도가 40Gb/s 이상으로 증가함에 따라 보상 시간이 수 초대에 이르는 기존의 방법에 의해 PMD를 보상할 경우, 상당히 많은 양의 데이터 손실을 감수할 수밖에 없다. 이러한 상황에서 PMD 보상을 위한 시스템에 있어서 편광제어 시스템의 실시간의 편광제어는 필수 불가결하고 이러한 편광제어 시스템의 핵심은 편광제어 알고리즘이라고 할 수 있겠다. 본 연구에서는 세 점 측정 방식의 동

작원리가 간단하고 동작 속도가 향상된 새로운 편광제어 알고리즘을 제시하였고, 제안한 새로운 편광제어 알고리즘을 적용하여 성공적인 실시간 편광제어 동작을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] Seoyong Shin, et al., "Real-time endless polarization tracking and control system for PMD compensation", *Technical Digest of OFC 2001*, TuP7, 2001.
- [2] Steffen Vogel, "Back to basics: DWDM components, configurations, and test equipment" *LIGHTWAVE*, vol. 17, issue. 5, April, 2000
- [3] B. W. Hakki, et al., "Polarization Mode Dispersion Compensation by Phase Diversity Detection" *Photonics Technology Letter*, vol. 9, no. 1, pp.121-123, 1997.
- [4] H. Ooi, et al., "Automatic polarization-mode dispersion compensation in 40-Gbit/s transmission", *Technical Digest of OFC99*, vol.2, paper WE5, pp.86-88, 1999.
- [5] H. A. Haus, et al, "Estimation of polarization parameters for compensation with reduced feedback", *Technical Digest of OFC 2001*, WAA6, 2001.

송 홍 석(Hong-suk Song) 준회원



2000년 2월 : 명지대학교
정보통신공학과 졸업
2000년 3월~현재 : 명지대학교
공과대학 정보통신
공학과 석사과정

<주관심 분야> 자동 편광제어 시스템, 편광모드분산 보상, 광 버퍼, 광 압축기, 광 네트워크

정 현 수(Hyun-soo Jung)

준회원



2001년 2월 : 명지대학교

전기전자공학부 졸업

2001년 3월 ~ 현재 : 명지대학교

공과대학 정보통신

공학과 석사과정

<주관심 분야> 자동 편광제어 시스템, 편광모드분산 보상, 광 버퍼, 광 압축기, 광 네트워크

신 서 용(Seoyong Shin)

종신회원



1987년 2월 : 서울대학교

제어계측공학과 (공학사)

1989년 8월 : Florida공대과대학

(석사)

1992년 12월 : Texas A&M

Univ.(공학박사)

1994년 : 한국전자통신 연구원 선임연구원

1994년 9월 ~ 현재 : 명지대학교 전자정보통신공학부
부교수

<주관심 분야> 광 스위칭 시스템 구조 및 구현 기술,
자동 편광제어 시스템, 편광모드분산 보상
광 버퍼, 광 압축기, 광 네트워크