

일 반 투 고

편광모드분산의 광학적 보상 방법

이 경 식*, 주 무 정**, 고 제 수**, 이 종 현**

*성균관대학교 정보통신공학부, **한국전자통신연구원 광통신연구부

I. 서 론

광통신시스템의 전송속도 B 와 전송거리 L 이 증가함에 따라서 편광모드분산(polarization mode dispersion, PMD)이 시스템 성능에 끼치는 영향이 더욱 더 심각해져서 40 Gbit/s 이상의 시스템에서는 주된 제한 요소^[1]가 된다. 예를 들면, 1년 중에서 시스템에 주는 파워어 페널티가 1dB 이상 되는 경우를 30분 이내(가용률 \approx 99.995%)로 줄여주기 위해서 요구되는 PMD 값은 $PMD^2 \approx 0.02/B^2L$ 이기 때문에 40 Gbit/s로 100 km를 전송하는데 요구되는 PMD 값은 $0.35 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 보다 작아야 한다. 그러나 기존의 광섬유에서 PMD 값은 대략 수 $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ 정도가 되기 때문에 10 Gbit/s 또는 40 Gbit/s 이상의 시스템에서는 PMD를 반드시 완화시켜 주든지 또는 보상방법을 통해서 PMD를 보상시켜 주어야 한다.

광통신시스템 전체의 PMD는 광섬유의 PMD에 광통신부품의 PMD를 합한 값으로 나타낼 수 있는데, 광통신부품에서 PMD 발생 요인인 복굴절은 크기와 축 방향이 일정하기 때문에 쉽게 PMD를 보상^[2]할 수 있다. 하지만 광섬유 내의 복굴절들은 시간에 따라서 또한 외부 환경변화에 따라서 달라지기 때문에 PMD를 보상하는 것이 그리 간단하지 않다.

2장에서는 편광모드 분산의 요인을 포함해서 PMD에서의 PSM 모델(Principal States Model), PMD 벡터 및 이차 PMD 계수에 대해서 설명하고, 3장에서는 여러 가지 일차 및 이차 PMD

보상방법과 그리고 PMD 모니터링 방법에 대해서 개념 위주로 간단하게 설명하고자 한다.

II. 편광모드 분산

1. 복굴절과 편광모드결합

단일모드 광섬유에는 최저차 모드인 LP_{01} 모드만이 존재하나, 엄밀히 구분한다면 두 개의 서로 수직으로 선형 편광된 LP_{01} 모드가 존재한다. 광섬유에는 대부분의 경우 추출과정이나 케이블 포설 과정에서 발생하는 복굴절(주로, 선형 복굴절)이 있으며, 따라서 이 두 개의 서로 수직인 편광 모드들 사이에 군속도 차가 발생하게 된다. 이 때문에 펄스가 퍼지게 되고 신호가 왜곡이 되는 데 이러한 현상을 편광모드 분산(polarization mode dispersion, PMD)이라고 하며, 광 선로에서의 복굴절은 PMD의 주요 원인이 된다. 광통신 시스템의 PMD에 영향을 미치는 복굴절은 흔히 온도와 시간에 따라서 변할 수 있다.

광섬유에 존재하는 복굴절은 제작할 때 광섬유의 구조가 비대칭이거나 내부에 스트레스가 있다든지 할 때 발생하며, 이상적인 광섬유라 하더라도 설치할 때 생기는 구부림이나 압박 등에 의해서 발생한다. 이러한 복굴절이 있는 매질 내부에서는 서로 수직인 두 편광모드 LP_{01} 모드의 유효 굴절률이 서로 다르기 때문에, 입사하는 빔의 편광 방향이 복굴절의 축 방향과 일치하지 않는 대부분의 경우, 편광상태(state of polarization, SOP)가 계속 변화하게 되며 비트 거리(beat

length) 만큼의 거리를 진행한 후에는 두 편광모드 간에 360도의 위상 차가 발생하게 된다. 이렇게 시간상에서 두 모드 사이에서 발생하는 군속도차(group delay difference)를 DGD(differential group delay)라고 한다. 짧은 길이의 광섬유(short-length regime)에서는 DGD가 일정하다고 볼 수 있지만 장거리(long-length regime)에서는 복굴절의 축 방향이 임의로 변한다고 봐야 하기 때문에 전송거리 L 에 비례해서 DGD가 증가하지 않고 \sqrt{L} 에 비례한다. 복굴절이 있는 곳이나 굴절률이 변하는 곳에서는 편광모드 결합(polarization mode coupling)이 일어나며^[3], 이 때문에 편광모드결합이 DGD를 감소시켜 주기도 하지만 광섬유시스템에서의 PMD는 랜덤하며 따라서 통계적 방법으로 해석하여야 한다. 이와 같이 편광모드결합으로 한쪽 모드의 파워가 $1/e^2$ 로 줄어드는 전송거리를 L_c (correlation length)라고 하며 광섬유케이블의 경우 1km 정도 된다. 광통신시스템은 주로 $L \gg L_c$ 영역에 해당되며 따라서 PMD 계수의 단위는 $\text{ps}/(\text{km})^{1/2}$ 이다.

2. PSM 모델

장거리를 광섬유를 통해서 광 펄스를 보낼 때 복굴절 축들이 임의의 값들을 갖기 때문에 랜덤 모드결합으로 정확하게 펄스 모양을 예측하는 것은 복잡하지만, 편광에 의존하는 손실(Polarization Dependent Loss, PDL)이 없고 광원의 코히어런스 길이 L_c 가 DGD 보다 길다고 가정할 때, 출력펄스의 모양이 대체적으로 변하지 않는 두 입력 편광 상태가 있는데 이것을 PSP(Principal States of Polarization)라고 한다. 다시 PSP를 주파수 상에서 설명하면 출력편광 상태가 주파수에 따라서 일차적으로(to first order) 불변하는 입력 편광상태를 말한다. 이들 두 입력상태, 즉, 입력 PSP는 서로 수직이며 이에 해당되는 한 쌍의 출력 PSP도 존재하는데, 광섬유의 전송매트릭스(transmission matrix)를 알면 입력 PSP로부터 출력 PSP를 쉽게 구할 수 있다. 이 두 상태를 갖는 펄스 사이의 시간

지연을 DGD($\Delta\tau$)라고 하고 이 값은 광섬유의 전송매트릭스의 요소와 관계가 있다.

따라서 두 PSP가 혼합이 된 펄스 신호를 입사시킬 때 DGD로 인해서 펄스 퍼짐(pulse broadening) 현상이 일어나며, 시간지연이 L_c 값에 근접하게 되면 depolarization이 일어난다. 두 PSPs를 반반씩 혼합된 상태로 전송하는 경우 depolarization 현상이 최대가 되며, 한 쪽 PSP로만 입사 시키는 경우에는 일차 근사적으로 말하면 depolarization이 일어나지 않는다고 말할 수 있으며, 이때 펄스 퍼짐이 최소로 일어난다. 물론 이와 같이 한쪽 PSP 상태로 입사시키는 경우라 할지라도 편광모드 결합이 일어난다는 지, 출력 PSP와 시간지연이 주파수에 의존하게 되면 펄스 퍼짐이 일어나지만 일차적으로는 이러한 조건에서 시스템의 성능 저하를 최대로 막아 줄 수 있다. 이와 같이 일차 PMD 현상을 쉽게 설명하기 위해서 Poole와 Wagner^[4]에 1986년 의해서 도입된 모델을 PSM(Principal States Model) 모델이라고 한다.

3. PMD 벡터

앞에서 설명한 PSM 모델을 근거로 해서 크기는 DGD 값 $\Delta\tau$ 가 되고 벡터방향은 PSP의 두 축 방향과 나란한 PMD 벡터를 도입할 수 있으며, 이 때 PMD 벡터의 방향은 PSP의 지축(slow axis) 방향과 같고 이 방향과 반대방향은 PSP의 속축(fast axis) 방향과 같다. 주파수가 변화할 때 이 PMD 벡터 방향을 중심으로 출력 편광상태가 Poincare sphere 상에서 회전하게 된다. 만일 주파수가 $\Delta\omega$ 만큼 변한 경우 Poincare sphere 상에서 축을 중심으로 회전한 각 ϕ 는 $\Delta\tau\Delta\omega$ 와 같다. 만일 광섬유에 대한 PMD 벡터의 크기와 방향이 주파수에 무관하게 일정하다면 주파수가 변화함에 따라서 출력편광 상태는 원을 그리게 된다. 그러나 실제로는 광섬유 링크의 PMD 벡터의 크기와 방향은 주파수에 따라서 달라지기 때문에 좁은 주파수 범위 안에서만 호(circular arc)를 그리게 된다.

4. 이차 PMD

일반적으로 광섬유의 PMD 벡터 \mathbf{k} 는 주파수 ω 에 따라서 달라지기 때문에 중심주파수 ω_0 를 중심으로 신호 대역폭이 $\Delta\omega$ 라고 가정하고 테일러 시리즈로 전개하는 경우 이차 PMD 벡터 $d\mathbf{k}/d\omega$ 가 구해지게 되는데 두 개의 항으로 되어 있다. 첫 번째 항은 파장에 따른 DGD의 변화량으로써 편광에 의존하는 색분산(Polarization-dependent chromatic dispersion, PCD)의 원인이 되며, 편광에 의존하는 펄스 수축과 펄스 퍼짐을 야기시킨다. 두 번째 항은 PSP depolarization을 나타내며 주파수에 따라서 PSPs가 얼마나 회전되는지를 말해주는 항이다. PSP depolarization 현상도 일차 PMD 보상기의 성능을 열화 시켜 주는 요인이 된다.

PSP의 주파수대역폭 $\Delta\omega_{\text{psp}}$ 이 얼마나 되는지를 아는 것도 중요하다. 여기서, $\Delta\omega_{\text{psp}}$ 는 PMD 벡터가 거의 일정한 주파수 영역을 의미하며, 정확한 PMD에 대한 측정을 하기 위해서는 이 주파수 대역 안에서 실험이 행해져야 한다. 대략적인 주파수대역 $\Delta\omega_{\text{psp}}$ 값은 $\Delta\omega_{\text{psp}} \cdot \overline{\Delta\tau} = \pi/4$ 와 같다^[5]. 여기서 $\overline{\Delta\tau}$ 는 광섬유의 DGD 평균치 값이다.

III. PMD 보상방법

광통신시스템의 전송레벨을 2.5 Gb/s에서 10 Gb/s로 또는 40 Gb/s로 높여주기 위해서는 특히 기존에 설치된 광섬유시스템의 PMD를 크게 완화시켜 주어야 한다. 완화시켜줄 수 있는 방법으로 PMD 값이 적은 광섬유를 포설하거나, PMD에 강한 변조방식을 택할 수도 있겠으나 흔히 사용하는 방법으로 PMD 보상 방법을 통해서 PMD를 줄여주는 보상방법이 있다. 그런데 PMD를 보상하기 위해 사용하는 PMD 보상기의 요구되는 보상속도는 설치된 광섬유링크에서 발생하는 PMD의 변화 속도에 의존한다. 일반적으로 광섬유의 온도변화는 속도가 아주 늦지만 사람에 의

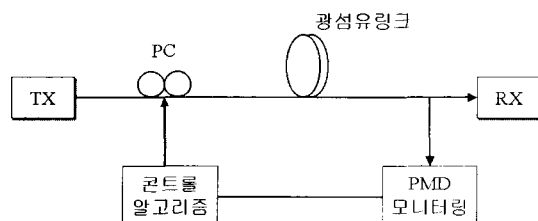
해서 생기는 PMD 변화속도는 빨라서 1.8초의 변화 속도가 측정되기도 하였으며^[6], 인위적으로 광섬유 피그테일을 움직이는 특수한 환경에서는 지금까지 보고된 변화 속도 중에서 가장 빠른 속도인 6~13 ms^[7]의 변화속도가 관측되기도 하였다.

여기에서는 우선, 일차 및 이차 보상방법으로 나누어서 PMD 보상방법^[6-20]을 설명하고자 하였으며, PMD 일차 보상방법으로 크게 PSP 전송방법, PMD nulling 방법 그리고 Fixed DGD 방법으로 나누어서 설명했다.

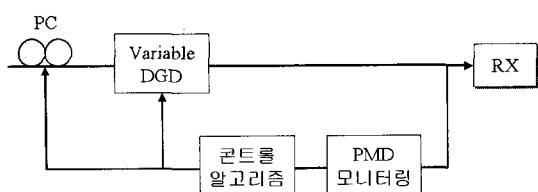
1. PMD 보상방법

PSP 전송방법 : 일반적으로 광학적으로 구현하는 PMD 보상방법은 PMD 모니터링 소자, 궤환신호 및 콘트롤 알고리즘으로 구성되어 있다. 일차적인 PMD 보상방법에는 우선 <그림 1>처럼 입력단에서 편광조절기(PC)를 조절하여 미리 신호를 PSP 상태로 조절함으로써 PMD를 보상하는 PSP 전송방법이 있다. 이 방법은 pretransmission 보상 방법으로써 송신단(TX)과 수신단(RX)에 특별히 하드웨어가 있어야 하며 궤환신호를 송신기까지 보내야 하기 때문에 보상속도가 늦다는 단점이 있다. 이 방법을 적용하여 이미 60 ps의 DGD가 있는 광섬유를 통해서 데이터를 10 Gb/s의 속도로 450 km 이상을 성공적으로 전송한 보상실험^[10]도 보고된 바 있다.

PMD nulling 방법 : 또 다른 일차 PMD 보상방법으로 출력단에서 PMD 보상기를 조절하여 전체 PMD 벡터 값이 제로가 되도록 하는 PMD nulling 방법^[2,11-13]이다. 이렇게 전체 PMD 값이 제로가 되게 하기 위해서는 PMD 보상기의



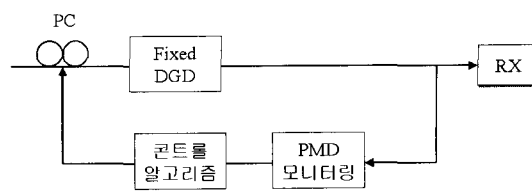
<그림 1> PSP 전송방법에 의한 1차 PMD 보상기의 구조



〈그림 2〉 PMD nulling 방법에 의한 1차 PMD 보상기의 구조

벡터 방향은 광섬유의 PMD 벡터 방향과 반대이고 크기는 동일하게 해 주어야 한다. 〈그림 2〉는 PMD nulling을 통해서 PMD 보상을 구현하는 것을 설명하기 위한 그림이다. 이런 원리에 근거한 보상방법은 주로 〈그림 2〉처럼 variable DGD를 포함하고 있으며, DGD를 조절하는 방법으로 지금까지 여러 가지 방법들이 보고된 바 있다. 이들 방법들 중에는 opto-mechanical 지연선을 구성해서 DGD를 조절할 수 있는 것을 특징으로 하는 보상 방법^[11], 편광유지 광섬유(PMF)로 된 비선형적으로 처프된 광섬유격자를 이용하는 방법^[12] 및 두 개의 편광유지 광섬유 사이에 편광조절기를 삽입함으로써 구현하는 방법^[13] 등이 보고된 바 있다. 또한 반파장판(half-wave plate) 또는 전파장판(full-wave plate)을 한 쌍의 PMF 사이에서 스위칭 함으로써 DGD를 더하거나 뺄 수 있도록 하게 하여 지연을 조절할 수 있도록 하게 한 variable DGD 소자가 있는 보상방법도 있다.

Fixed DGD 방법 : 이 방법은 보상기가 〈그림 3〉처럼 고정된 DGD 값을 갖는 소자와 편광조절기로 구성되어 있으며 동작시키는데 두 가지 모드가 있다. 흔히 시스템의 편광정도(degree of polarization, DOP)를 모니터링하여 편광조절기를 조절하여 광섬유와 보상기 전체의 PSP를 입력 편광상태와 같도록 맞춰줌으로써 보상을 하는 방법이 있고, 또 한 가지는 광섬유와 보상기 전체의 PMD 벡터로부터 생기는 페널티를 편광조절기를 조절하여 최소화 시켜줌으로써 보상하는 방법이 있다. 최근에는 DOP가 최대가 되도록 모니터링하여 편광조절기를 조절해 줌으로써 40 Gbit/s에서 adaptive PMD 보상^[16]을 실현한 연구 결과도 보고된 바 있다. 지금까지 설명한 보



〈그림 3〉 Fixed DGD 방법에 의한 1차 PMD 보상기의 구조

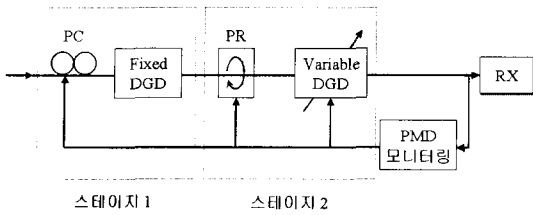
상방법의 보상원리는 모니터링하는 방법과 궤환 알고리즘에 따라서 실제로 구현되는 방법들과 약간 다를 수 있으며, 이러한 일차 보상방법이라 하여도 고차 PMD를 다소 완화시켜주기도 한다. 여기에서 설명한 PMD nulling 방법이나 Fixed DGD 방법은 전송후 보상방법(Post-transmission compensation)에 해당된다.

PMD 보상기의 동작속도를 빠르게 해주기 위해서는 콘트롤 파라미터의 수를 줄여주어야 한다. 하지만 고차 PMD보상을 해결해야 하는 경우는 콘트롤 파라미터 수(degrees of freedom, DOF)를 일차 PMD 보상의 경우 보다 더 늘려 줄 필요가 있다.

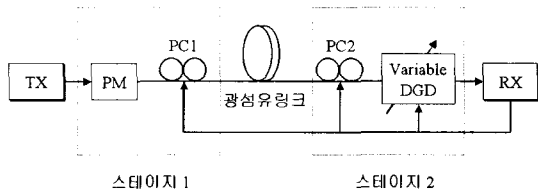
2. 고차 PMD 보상방법

고차 PMD가 시스템의 성능에 영향을 크게 미치게 될 때 고차 PMD까지 보상을 해 주어야 한다. 고차 PMD로 여기에서는 이차 PMD까지만 편의상 살펴보도록 하겠다. 일차 PMD 보상기가 흔히 한 개의 스테이지로 구현될 수 있는데 비해서 이차 PMD 보상기^[17-20]는 두 개 또는 세 개의 스테이지가 필요하며, 파라미터(DOF)의 수는 적어도 3개 이상이 필요하며 완전한 보상을 하기 위해서는 5개까지 필요하다.

〈그림 4〉는 두 개의 스테이지로 되어 있는 이차 PMD 보상기의 한 예를 보여주는 그림이다. 첫 번째 스테이지는 fixed DGD와 편광조절기(polarization controller, PC)로 구성되어 있으며 이차 PMD를 보상하기 위해서 사용하고, 두 번째 스테이지는 편광 회전자(polarization rotator, PR)와 variable DGD로 구성되어 있으며 일차 PMD를 보상하기 위해서 사용한다. 편광조절기는 보상기 입력단의 신호가 임의의 편



〈그림 4〉 두 개의 스테이지로 된 2차 PMD 보상기의 구조 (PC: 편광조절기, PR: 편광회전기)



〈그림 5〉 편광조절 및 위상변조를 통한 고차 PMD 보상기의 구조 (PM: 위상변조기, PC1(PC2): 편광조절기)

광상태가 될 수 있도록 조절하기 위해서 사용한다.

또 다른 고차 PMD 보상방법으로 송신단에서는 편광조절기와 위상변조기가 있고 수신단에서는 기존의 일차 PMD 보상기를 부착하여 사용함으로써 구현하는 고차 보상 방법이 있다. 〈그림 5〉는 이 보상방법의 동작원리를 설명하는 그림으로 동작순서는 다음과 같다. 우선, 수신단에서 일차 보상을 하고 수신단에서 송신단으로 고차 PMD에 대한 정보를 보낸 뒤, 송신기에서 나오는 신호의 SOP가 광섬유의 이차 PMD벡터와 방향이 반대가 되도록 조절해 준다. 마지막으로 이차 PMD에 의해서 생기는 색분산과 위상변조기에 의해서 생기는 처프 사이의 상호 작용을 통해서 펄스가 수축되게 해줌으로써 고차 PMD가 보상이 되게 해준다. 40Gb/s NRZ 시스템에 위에서 설명한 방법으로 이차 보상까지 해줌으로써 일차 보상시의 PMD tolerance ~7ps로부터 ~10ps로 향상시킨 보상실험 예도 있다.

3. PMD 모니터링 기술

PMD를 보상하기 위해서는 PMD에 대한 정보를 제환 루프를 통해서 보상기에 보내서 보상을 조절할 수 있어야 하기 때문에 PMD를 직

접 또는 간접적으로 모니터링하는 기술이 필요하다. 모니터링하는 방법은 우선 PMD에 대한 감도가 좋아야 하고 둘째로 감지 속도가 빨라야 한다.

PMD에 의해서 생기는 펄스 퍼짐에 의해서 spectral hole burning 현상, 즉, DGD가 RF의 반주기 $f_{min}=1/(2\Delta\tau)$ 와 같게 될 때 PSP상태의 두 RF 성분 사이에 180도의 위상차가 생긴다. 1990년에 Bahsoun^[21] 등은 RF 주파수가 f_{min} 일 때 RF의 파워어가 최소이며 이 방법을 이용해서 PMD를 측정할 수 있다는 것을 제안했으며, 이 방법을 통해서 최근에는 능동 PMD 분산 보상 실험^[22]도 실시한 바 있다. PMD 모니터링을 할 수 있는 또 다른 방법으로는 수신되는 신호의 총 RF 파워어를 측정함으로써 모니터링하는 방법이 있다. 이런 원리에 기초해서 RF 파워어가 최대가 되도록 하는 제환 알고리즘을 구현함으로써 PMD 보상을 실현한 예^[23]도 보고된 바 있다.

편광도(Degree Of Polarization, DOP)를 측정함으로써 PMD를 모니터링하는 방법도 있다. 이 방법은 넓은 스펙트럼에 걸쳐서 있는 빔을 일정시간 동안 여러 개의 수광소자와 편광자를 통해서 받아서 Stokes 파라미터를 구함으로써 편광도를 구할 수 있다. 최근에는 출력신호의 편광도가 최대가 되도록 제환 알고리즘을 실행하는 방법으로 자동적으로 PMD 보상을 구현한 연구 결과들도 보고된 바 있다.

IV. 결 론

지금까지 PMD 현상을 쉽게 설명해 줄 수 있는 PSM 모델과 PMD 특성을 수식적으로 나타낼 수 있는 PMD 벡터에 대해서 개념 위주로 간단하게 살펴보았고, 아울러 광학적으로 구현할 수 있는 여러 가지 PMD 보상 방법에 대해서도 알아보았다. 일차 PMD 보상기는 주로 편광조절기와 고정되어 있거나 조절 가능한 DGD로 구성된 한 개의 스테이지로 구현할 수 있으나, 이차 PMD 보상기는 일차와 이차를 각각 담당하는 스

테이지로 나누어서 구현할 수 있다. 어느 경우든 지 수신단에서 PMD를 모니터링해서 그 정보를 알고리즘에 따라서 궤환시켜 PMD 값을 조절하는 방식으로 이루어져야 한다. 초고속 광통신시스템에서 편광모드분산은 시스템의 성능향상을 제한 시켜주는 주된 요인으로 40Gbit/s 이상의 시스템에서 반드시 해결해 주어야 할 문제이기 때문에 앞으로도 PMD에 대한 지속적인 연구가 절실하게 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] P. Andrekson, "High speed soliton transmission on installed fibers," OFC'2000, Baltimore, USA, paper TuP 2, 2000
- [2] J. Y. Cho and K. S. Lee, "A birefringence compensation method for mechanically induced long-period fiber gratings," Optics Comm., 213, pp.281-284, 2002
- [3] K. S. Lee, J. Y. Cho, "Polarization mode coupling in birefringent fiber gratings," J. Opt. Soc. Am., 19, pp 1621-1631, 2002
- [4] C. Poole and Wagner, "Phenomenological approach to polarization dispersion in long single mode fiber," Elec. Lett. 22, pp1029-1030, 1986
- [5] R. Jopson, L. Nelson and H. Kogelnik, "Measurement of second-order PMD vectors in optical fibers," IEEE Photon. Techn. Lett., 11, pp1153-1155, 1999
- [6] D. Waddy et al., "The measurement of fast state of polarization changes in aerial fiber," OFC'01, Anaheim, USA, paper ThA3, 2001
- [7] H. Bulow et al., "Measurement of maximum speed of PMD fluctuation in installed field fiber," OFC'99, W, pp 83-85, 1999
- [8] H. Kogelnik and R. Jopson, "Polarization Mode Dispersion", Chapter 15, Optical Fiber Telecommunication III, Academic Press, 2001
- [9] T. Ono et al., "Polarization control method for suppressing polarization mode dispersion influence in optical transmission systems," IEEE J. Lightwave Techn., 12, pp891-898, 1994
- [10] T. Ono et al., "10Gb/s PMD compensation field experiment over 452km using principle state transmission method," OFC'2000, Baltimore, USA, PD-44, 2000
- [11] F. Heismann, D. Fisherman and D. Wilson, "Automatic compensation of first order PMD in a 10 Gb/s transmission system," ECOC'98, Madrid, Spain, pp529-530, 1998
- [12] S. Lee et al., "Adjustable compensation of polarization mode dispersion using a high birefringence nonlinearly chirped fiber Bragg gratings," IEEE Photon. Techn. Lett., 11, pp1277-1279, 1999
- [13] C. Martel et al., "Dynamic polarization mode dispersion compensation in WDM systems," ECOC'2000, Munich, Germany, pp41-43, 2000
- [14] D. Sobiski et al., "Fast first order PMD compensation with low insertion loss for 10Gbit/s system," Elet. Lett., 37, pp46-48, 2001
- [15] C. Francia et al., "Simple dynamic PMD compensator," Elet. Lett., 35, pp 414-415, 1999
- [16] S. Lanne et al., "Demonstration of adaptive PMD compensation at 40 Gb/s," OFC'01, Anaheim, USA, paper TuP3, 2001

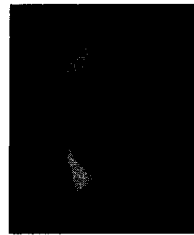
- [17] M. Karlsson, C. Xie, H. Sunnerud, P. Aderson, "Higher order polarization mode dispersion compensator with three degrees of freedom," in Optical Fiber Communication Conference, OFC'01, Anaheim, USA, paper MO1, 2001
- [18] S. Kim, "Schemes for complete -ompensation for polarization mode di-spersion up to second order," Optics Lett., 27, p577, 2002
- [19] Q. Yu, L. Yan, Y. Xie, H. Hauer, A. Willner, "Higher order polarization mode dispersion compensation using a fixed time delay followed by a variable time delay," IEEE Photon. Techn. Lett. 13, p863, 2001
- [20] L. Yan, Q. Yu, T. Luo, A. Willner, X. Yao, "Compensation of higher order polarization mode dispersion using phase modulation and polarization control in the transmitter," IEEE Photon. Techn. Lett. 14, p858, 2002
- [21] S. Bahsoun, J. Nagel and C. Poole, "Measurement of temporal variations in fiber transfer characteristics to 20 GHz due to PMD," ECOC'90, p1003, postdeadline paper
- [22] H. Pua et. al, "An adaptive first order PMD compensation system aided by polarization scrambling: theory and demonstration," J. Lightwave Tech., 18, p832, 2000
- [23] H. Bulow et al., "Adaptive PMD mitigation at 10Gb/s using an electronic siGe equalizer IC," ECOC'99, 2, pp138-139, 1999
- [24] H. Rosenfeldt et al., "Automatic PMD compensation at 40 Gb/s and 80 Gbit/s using a 3-dimensional DOP evaluation for feedback," OFC'2002, Anaheim, USA, PD27, 2002

저자 소개



李景植

1985년 8월 University of Colorado, Boulder, 전기전자공학, 박사, 1978년 12월~1980년 8월: 한국통신기술연구원(현, ETRI) 연구원, 1986년~1988년 8월: (미)국립표준연구원 NIST) 연구원, 1988년~1990년 2월: (미)TACAN Corp. 연구원, 1998년 9월~1999년 8월: University of Rochester, Institute of Optics, 방문교수, 1990년 3월~현재: 성균관대학교 정보통신공학부, 교수, <주관심 분야: 광통신소자 및 시스템, 광섬유소자, 광섬유센서, PMD 보상>



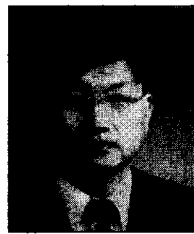
朱武楨

1985년 한국과학기술원 물리학과 박사, 1989년 독일 Heinrich-Hertz-Institut 방문 연구원, 1992년~1994년: 전북대학교 물리학과 겸임교수, 1985년~현재: 한국전자통신연구원 광링크 기술팀장, <주관심 분야: 광 증폭기술, WDM 광통신기술, 비선형광학>



高濟洙

1981년 울산대학교 전기공학과 (공학사), 1983년 고려대학교 대학원 전자공학과 (공학석사), 1983년 3월~현재: 한국전자통신연구원 네트워크연구소 광송수신기술팀장 책임연구원, <주관심 분야: 광 인터넷, WDM/SDH 광전송, 광송수신 기술, 초고속신호처리 기술>



李鍾弦

1983년 성균관대학교 전자공학과 석사, 1992년 성균관대학교 전자공학과 박사, 1992~1994년 2월: 정보통신연구관리단 파견 관리역, 1983년 3월~현재: 한국전자통신연구원 광통신연구부장, <주관심 분야: 광 인터넷, WDM/OXC 시스템>