스펙트럼 반전법을 이용한 10 Gb/s 광신호의 200 km 비분산천이 광섬유 전송

이상수 · 이창희

305-350 대전광역시 유성구 가정동 161번지 한국전자통신연구소 광파통신연구실

(1995년 11월 24일 받음)

색분산 보상법으로 스펙트럼 반전법을 사용하여 10 Gb/s 광신호의 200 km 비분산천이 광섬유 전송 실험을 수행하였다. 스펙트럼 반전 신호광은 분산천이 광섬유에서의 4광파 혼합 현상에 의해 발생되었다. 스펙트럼 반전 신호광의 반전효율과 신호대 잡음비는 각각 −26.7 dB와 23.0 dB였다. 수신감도 측정 결과 광섬유를 사용하지 않은 경우 BER 10^{-9}에서 −28.0 dBm이었고, 200 km의 비분산천이 광섬유를 사용한 경우에 대해서는 −27.0 dBm이었다.

I. 서 론

현재 포설되어 있는 대부분의 광섬유는 1,310 nm에서 색분산이 영인 비분산천이 광섬유(non-dispersion shifted fiber; NDSF)로서, 이를 전송로로 사용하여 1,550 nm 영역의 10 Gb/s 광신호를 전송할 경우 전송거리는 광섬유의 색분산에 의해 제한된다. 광송신기로 외부변조기를 사용할 경우의 전송거리는 약 60 km, 반도체 레이저 직접변조방식을 사용할 경우에는 10 km 미만이 된다.[1] 따라서 장거리 전송을 위해서는 색분산의 영향을 극복해야만 한다. 이를 위한 가장 좋은 방법은 분산천이 광섬유를 사용하는 것이지만 광섬유를 포설하는데 소요되는 막대한 비용 때문에 색분산 보상법을 채용하여 기존의 비분산천이 광섬유를 사용하는 방법도 적극적으로 검토되고 있다. 현재 색분산 보상법중 시스템 응용에 가장 적합한 방법은 큰 역분산 특성(~ −80 ps/nm.km)을 갖는 색분산 보상용 광섬유(dispersion compensation fiber; DCF)를 사용하는 방법[2]과 전송로의 가운데 지점에서 4광파 혼합(four-wave mixing) 현상[3]에 의해 발생되는 스펙트럼 반전 신호광을 이용하여 색분산을 보상해 주는 스펙트럼 반전법(spectral inversion method)[4]이 있다.

색분산 보상용 광섬유는 광섬유의 비선형 효과에 의해 특성이 열화되며, 전체 전송길이의 1/4 정도의 보상용 광섬유가 필요하고, 손실이 일반단일모드 광섬유의 두배 정도 되기 때문에 전송거리가 길어질수록 불리하다. 그렇지만 스펙트럼 반전법은 전송구간의 중간에서 전파되어 온 신호의 스펙트럼을 반전시켜 주기만 하면 색분산이 보상되므로 장거리 전송에서 특히 유리하다. 이때 스펙트럼 반전을 일으키는 비선형 매질로는 주로 반도체 레이저 증폭기[5,6]와 분산천이 광섬유[7]가 사용된다. 반도체 레이저 증폭기는 비교적 넓은 파장 범위에서도 위상정합조건이 만족되고[8] 소형화 시킬 수 있다는 장점이 있으나 자연방출광 성분에 의해 스펙트럼 반전 신호광의 신호대 잡음비가 나빠지는 단점이 있다. 반면에 분산천이 광섬유는 위상정합조건의 만족이 까다롭고 광섬유에서의 비선형성에 의해 스펙트럼 반전 효율이 제한되지만 자연방출광 성분이 적기 때문에 스펙트럼 반전 신호광의 신호대 잡음비 특성이 좋다. 현재까지 관련 분야의 연구결과를 보면 송신기로 외부변조기를 사용한 경우에는 2채널의 10 Gb/s 광신호를 560 km 전송한 것이 있었고[9], 직접변조 송신기를 사용한 경우에는 10 Gb/s 단일채널로 200 km 전송한 결과가 보고된 바 있다.[10] 그러나 국내에서는 이와 관련된 연구가 전무한 실정으로 현재 국내에 포설된 광섬유가 모두 비분산천이 광섬유임을 감안한다면 관련분야의 연구가 시급하다.

본 논문에서는 스펙트럼 반전 신호광을 이용하여 광섬유에서의 색분산을 보상하기 위해 분산천이 광섬유를 비선형 매질로 사용하여 4광파 혼합 특성을 고찰하였다.

*본 연구는 HAN/B-ISDN 공동연구개발사업 중 10 Gb/s SDH 광전송 시스템 개발 과제의 일환으로 수행되었으며, 본 논문의 저자들은 실험에 사용된 송수신기를 제작해 주신 송재호, 윤태열, 한정희, 곽봉신, 유태환, 박문수 박사와 실험에 많은 도움을 주신 박창수, 이만섭 박사께 감사드립니다.

이를 토대로 스펙트럼 반전기를 구현하여 200 km의 비분산천이 광섬유에서 색분산을 보상하여 10 Gb/s 광신호를 전송하였다. 그 결과 광섬유를 사용하지 않은 경우의 수신감도는 －28.0 dBm이었고, 200 km의 비분산천이 광섬유를 사용한 경우에는 －27.0 dBm이었다.

본 논문에서는 제 2장에서 광섬유에서의 4광파 혼합 현상 및 스펙트럼 반전법에 대하여 기술하였고, 제 3장에서 4광파 혼합 실험 결과 및 색분산 보상 실험 결과를 기술하였고, 마지막으로 제 4장에 결론의 순으로 구성되어 있다.

II. 4광파 현상 및 스펙트럼 반전법

서로 다른 주파수를 갖는 강한 세기의 빛이 광섬유와 같은 비선형 매질에 입사하면 매질내에는 3차 비선형 편극(3rd order nonlinear polarization) 이 유도된다. 이때 주파수가 f_1, f_2, f_3인 광파가 입사되어 3차 비선형 현상에 의해 새로운 주파수 f_4를 가지는 빛이 발생되는 현상을 4광파 혼합 현상이라고 한다. 그런데 본 논문에서는 두 펌프광 f_1, f_2의 주파수가 같은 경우에 대하여만 고려한다. 이 경우 주파수가 $f_1(=f_2)$인 펌프광 E_p와 주파수가 f_3인 신호광 E_s에 의해 발생되는 두개의 새로운 광파 E_s^*, E_p^*의 주파수는 각각 $2f_1-f_3$, $2f_3-f_1$의 관계를 가진다. 여기서 $2f_1-f_3$를 보면 원래의 신호광 E_s에서 스펙트럼의 앞부분이 단파장이고, 뒷부분이 장파장이었던 펄스는 앞부분이 장파장, 뒷부분이 단파장인 펄스로 스펙트럼 성분이 반전된다. 이때 스펙트럼이 반전된 새로운 광파를 효율적으로 생성하기 위해서는 위상정합조건을 만족시켜야 한다. 위상정합조건은 비선형 매질로 광섬유를 사용하는 경우 광섬유의 영분산 기울기, 영분산파장 및 펌프광과 신호광의 파장 차이 등에 의해 결정되며, (식 1)과 같이 표현된다.[7]

$$\Delta\beta = -\frac{\lambda^4\pi}{c^2}\frac{dD_c}{d\lambda}2(f_p-f_s)^2(f_p-f_0) \tag{1}$$

위식에서 $dD_c/d\lambda$는 광섬유의 영분산 기울기, f_p는 펌프광의 주파수, f_s는 신호광의 주파수, f_0는 광섬유의 영분산 파장을 주파수로 나타낸 것이다. 식에서 알 수 있듯이 위상정합조건은 비선형 매질로 사용되는 광섬유의 영분산파장과 펌프광의 파장이 일치하는 경우 ($f_p=f_0$) 가장 잘 만족된다.

스펙트럼 반전 신호광의 세기 P_s^*는 위상정합조건이 잘 만족되는 경우 (식 2)와 같이 표현된다.[7]

$$P_s^* = \frac{9216\pi^6}{n^4\lambda^2c^2}(\chi^{(3)})^2\frac{P_p^2P_s}{A_{eff}^2}e^{-\alpha L}L_{eff}^2 \tag{2}$$

위식에서 n은 광섬유의 굴절율, $\chi^{(3)}$는 3차 비선형 감수율, P_p, P_s는 각각 펌프광과 신호광의 세기를 나타내며, A_{eff}는 광섬유의 유효 단면적, L_{eff}은 광섬유의 유효길이, L은 광섬유의 길이, α는 광섬유의 손실계수를 나타낸다. 그리고 펌프광과 신호광은 모두 x축 방향으로 선편광되었다고 가정하였다. 식에 나타난 바와 같이 스펙트럼 반전 신호광의 세기는 펌프광 세기의 제곱, 신호광 세기에 비례하므로 펌프광의 세기를 크게 하는것이 유리하지만 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering; SBS) 효과에 의해 그 세기가 제한된다.[11]

그런데 실제의 경우에 있어서는 광섬유 전체 길이에 대해 색분산 값이 일정하지 않기 때문에 위상정합조건은 광섬유 길이에 따라 변화하게 된다. 따라서 광섬유의 색분산 특성이 일정하다고 보고 계산한 결과와 실제 실험치는 차이가 있을 수 있다.

광섬유와 같이 등방성을 갖는 매질에서 3광파 $E(f_1)$, $F(f_2)$, $G(f_3)$에 의해 유도되는 3차 비선형 편극의 x,y 성분은 각각 다음과 같이 표현된다.[12]

$$P_{NL,x}(f_1) = 3\chi^{(3)} \left[E_xF_xG_x + \frac{1}{3}(E_xF_yG_y + E_yF_yG_y + E_yF_yG_y)\right] \tag{3}$$

$$P_{NL,y}(f_1) = 3\chi^{(3)} \left[E_yF_yG_y + \frac{1}{3}(E_xF_xG_y + E_xF_yG_x + E_yF_xG_x)\right] \tag{4}$$

만일, 모든 광원이 x방향으로 선편광되었다면, $E_x=F_x=G_x=A$, $E_y=F_y=G_y=0$이므로 $P_{NL,X}=3\chi A^3$, $P_{NL,y}=0$이 되지만, $E(f_1)$가 y축으로 편광되고, $F(f_2)$, $G(f_3)$가 x축으로 편광된 경우라면 $E_y=F_x=G_x=A$, $E_x=F_y=G_y=0$이므로 $P_{NL,X}=\chi A^3$, $P_{NL,y}=0$이 된다. 따라서, 광원의 편광상태가 서로 직교(orthogonal)하는 경우 비선형성은 1/3로 감소한다. 그런데, 스펙트럼 반전 신호광의 세기는 비선형성의 제곱에 비례하므로 실제 반전광의 세기는 1/9로 감소한다.

다음은 스펙트럼 반전법에 관하여 알아보도록 한다. 광섬유의 비정상분산영역(anomalous dispersion region, 입사광의 파장이 광섬유의 영분산 파장보다 장파장인 경우)에서 신호가 전송되는 경우 단파장의 군속도가 장파장의 군속도 보다 빠르다. 그러므로 펄스의 앞쪽이 단파장, 뒷부분이 장파장인 신호광 펄스는 (그림 1)에

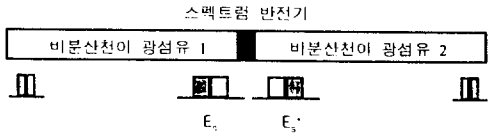

그림 1. 스펙트럼 반전을 이용한 색분산 보상.

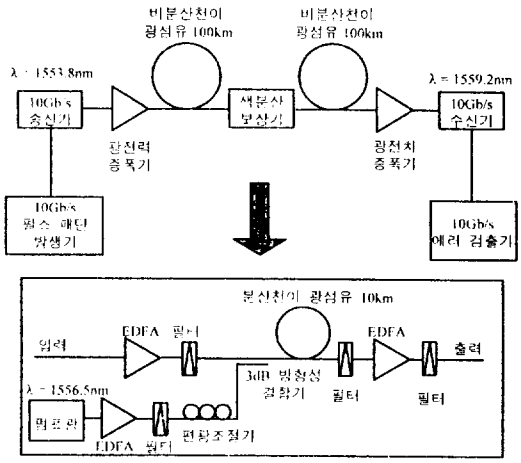

그림 2. 색분산 보상 실험도.

나타난 바와 같이 비분산천이 광섬유 1을 진행해 오면서 광섬유의 색분산에 의해 펄스폭이 넓어진다. 그런데 전송로의 가운데 지점에서 스펙트럼이 반전되면 처핑의 방향이 반전되어(펄스의 앞부분이 장파장, 뒷부분이 장파장) 비분산천이 광섬유 2를 진행하면서 펄스폭이 좁아지게 된다. 따라서 비분산천이 광섬유 1과 2의 총색분산 양이 같다면 수신단에서는 왜곡이 없는 원래의 펄스를 얻을 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 광섬유의 색분산을 보상하는 방법을 스펙트럼 반전법이라고 한다.

III. 실험 및 결과

1. 4광파 혼합 실험

분산천이 광섬유를 비선형 매질로 사용하여 (그림 2)의 하단과 같이 색분산 보상기를 구성한 후 광 스펙트럼 분석기(Advantest, Q8383)로 출력광을 검출하여, 위상정합조건이 잘 만족되는 펌프광의 파장 및 신호광과 펌프광의 파장차이를 실험적으로 구하였다. 펌프광과 신호광은 모두 가변 파장 반도체 레이저(펌프광 Sanctec TSL-300, 신호광 E-TEK PLDS 1550)를 사용하였고, 각각 광증폭기로 증폭되어 분산천이 광섬유의 입력단에서의 세기가 +8.0 dBm과 +5.0 dBm이 되도록 하였다. −3 dB 투과대역 폭이 2.0 nm이고, 손실이 약 2 dB인

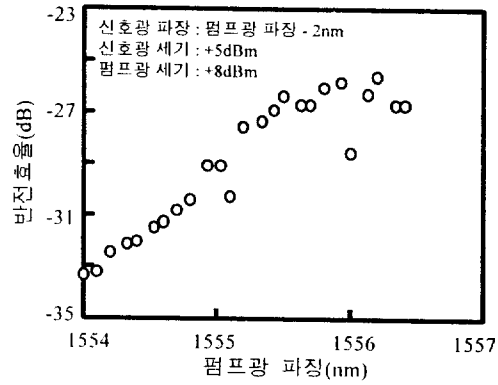

그림 3. 펌프광 파장 변화에 대한 반전효율 특성.

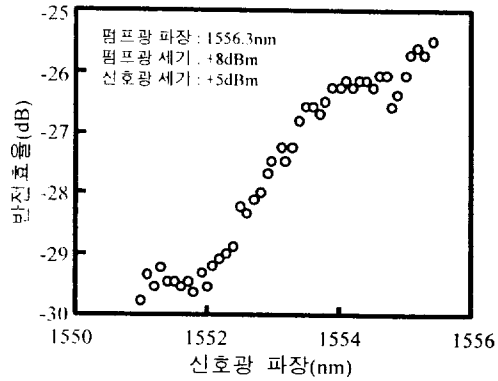

그림 4. 신호광 파장 변화에 대한 반전효율 특성.

광학필터(JDS Fitel TB1500B)를 사용하여 출력광과 함께 출력되는 자연방출광 성분을 제거하였고, 펌프광 출력단에 편광 조절기를 사용하여 스펙트럼 반전 신호광의 세기가 최대가 되도록 펌프광의 편광상태를 조절하였다. 비선형 매질로 사용된 분산천이 광섬유(Fujikura DSM 8/125)는 길이가 10 km, 손실은 0.22 dB/km, 영분산 파장은 1556.3 nm이고, 영분산 기울기는 0.068 ps/nm^2·km였다.

신호광과 펌프광의 파장차이를 2 nm로 고정하고(신호광 파장=펌프광 파장−2.0 nm), 펌프광의 파장을 1554.0 nm～1556.4 nm까지 변화 시킬 경우의 반전 효율을 (그림 3)에 나타내었다. 여기서 반전효율은 입력신호광 세기와 스펙트럼 반전 신호광 세기의 차를 의미한다. 반전효율은 펌프광의 파장이 분산천이 광섬유의 영분산 파장 부근인 1556 nm에서 최대 −26.0 dB였으며, 영분산 파장과 차이가 날수록 감소하였다. 펌프광의 파장을 1556.3 nm로 고정시키고, 신호광의 파장을 1551.0 nm～1554.4 nm까지 변화시킬 경우의 반전 효율을 (그림 4)에 나타내었다.

신호광의 파장이 1555.4 nm로 펌프광의 파장과 가까울 경우 반전효율은 －25.5 dB였고, 신호광과 펌프광의 파장 차이가 날수록 반전 효율은 감소하였다. 위 실험 결과로부터 펌프광의 파장은 분산천이 광섬유의 영분산 파장인 1556 nm 부근이 적합하며, 신호광의 파장은 펌프광의 파장과 가까울수록 위상정합조건이 잘 만족되어 스펙트럼 반전 신호광의 세기가 최대가 됨을 알 수 있었다.

2. 색분산 보상 실험

색분산 보상을 위한 광링크는 (그림 2)와 같이 전송로인 200 km의 비분산천이 광섬유, 10 Gb/s 광송수신부 및 위상정합조건이 만족된 색분산 보상기로 구성되었다. 광송신부는 파장이 1553.8 nm인 광원과 대역폭이 10 GHz 이상, 구동전압 6V인 $LiNbO_3$ 외부변조기(AT&T m2123c)로 구성된 송신기와 최대출력이 ＋13 dBm인 광전력 증폭기로 구성되어 있다. 10 Gb/s 펄스 패턴발생기(Advantest D3185K) 에 의해 강도변조된 송신 광(PRBS 2^7-1)은 광전력 증폭기에 의해 ＋8.0 dBm으로 증폭되어 100 km의 비분산천이 광섬유로 전파된 후 색분산 보상기의 입력 신호광이 된다. 분산천이 광섬유 입력단에서 입력신호광의 세기는 광증폭기로 증폭되어 ＋6.7 dBm이었다. 펌프광은 파장가변 레이저의 파장을 사용된 분산천이 광섬유의 영분산 영역인 1556.5 nm로 하고, 그 출력이 ＋11.5 dBm이 되도록 하였다. 신호광의 파장이 펌프광의 파장과 2.7 nm 차이가 나는 것은 너무 근접한 경우 스펙트럼 반전 신호광과 잔류 펌프광의 분리가 어렵기 때문이다. 이 경우 4광파 혼합 현상에 의해 발생된 스펙트럼 반전 신호광의 파장은 1559.2 nm이며, 그 세기는 －20.0 dBm이었다. 이 스펙트럼 반전 신호광은 다시 증폭되어 100 km의 비분산천이 광섬유 2로 전파되어 광전치 증폭기와 10 Gb/s 광수신기로 구성된 광수신부로 입력된다. 수신부에서 재생된 데이타와 클락은 10 Gb/s 에러 검출기(Advantest D3285K)로 보내져서 비트 에러율을 측정하도록 되어 있다.

분산천이 광섬유의 출력광 스펙트럼을 (그림 5)에 나타내었다. 잔류 신호광, 잔류 펌프광, 스펙트럼 반전 신호광 이외에도 1551.1 nm의 파장을 가지는 스펙트럼 반전된 펌프광 및 펌프광과 스펙트럼 반전된 신호광 간의 작용으로 발생한 1561.9 nm 성분도 함께 볼 수 있으나 그 세기는 미약하다. 이때 중요한 점은 전송품질에 결정적인 영향을 미치는 스펙트럼 반전 신호광의 신호대 잡음비와 반전효율이다. 본 실험에서는 스펙트럼 반전기 전단에서 펌프광과 신호광에 대해 모두 필터를 사용하여 광증폭기에서 출력되는 자연방출광 성분을 제거해 줌으로써 23.0 dB의 신호대 잡음비를 얻을 수 있었다. 그리고 펌프광과 신호광의 파장차이를 2.7 nm로 하고, 펌프광의 파장을 스펙트럼 반전기로 사용된 분산천이 광섬유의 영분산 파장 부근인 1556.5 nm로 하여 위상정합조건이 잘 만족되도록 했을때의 반전효율은 분산천이 광섬유의 손실을 포함하여 －26.7 dB가 되었다.

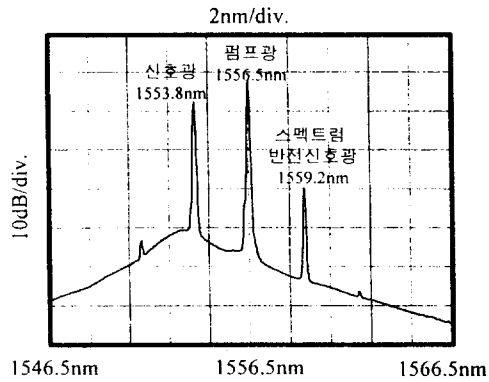

그림 5. 색분산 보상기 출력 스펙트럼.

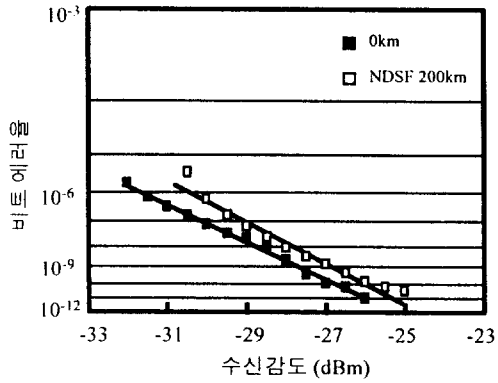

그림 6. 수신감도 측정결과.

광섬유를 사용하지 않은 경우(0 km)와 200 km의 비분산천이 광섬유를 사용하여 10 Gb/s 광신호를 전송할 경우의 BER특성을 (그림 6)에 나타내었고 이때 광수신기의 주증폭기 출력 eye diagram을 (그림 7)에 나타내었다. 여기서 광섬유를 사용하지 않은 경우란 송신단에 스펙트럼 반전기, 수신단에 광전치 증폭기가 있으며 전송로인 비분산천이 광섬유는 없는 경우를 의미한다. 0 km일 경우 수신감도는 BER 10^{-9}에서 －28.0 dBm이었고, 200 km의 비분산천이 광섬유에 대해서는 －27.0 dBm이었다. 수신기의 eye diagram은 0 km와 200 km의 경우 eye opening의 차이가 거의 없었다. 따라서 색분산 보상이 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 광섬유를 사용한

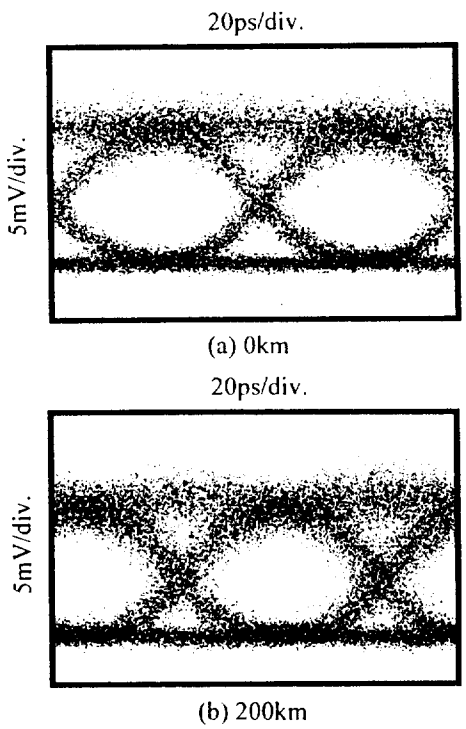

그림 7. Eye diagram 특성.

경우 페널티는 1.0 dB였고, 이는 광섬유에서의 비선형효과에 의한 신호광의 왜곡과 스펙트럼 반전시 전단과 후단의 색분산 불일치로 인한 잔류 색분산에 기인한다고 볼 수 있다.

IV. 결 론

색분산 보상법으로 분산천이 광섬유에서의 4광파 혼합현상을 이용한 스펙트럼 반전법을 사용하여 외부변조된 10 Gb/s 광신호의 200 km 비분산천이 광섬유 전송실험을 하였다. 위상정합조건이 만족되는 펌프광의 파장 및 펌프광과 신호광의 파장차이를 실험적으로 구하였고, 이를 이용하여 −26.7 dB의 반전효율과 23.0 dB의 신호대 잡음비를 얻을 수 있었다. 전송실험 결과 광섬유를 사용하지 않은 경우의 수신감도는 BER 10^{-9}에서 −28.0 dBm이었으며, 200 km의 비분산천이 광섬유를 사용한 경우의 수신감도는 BER 10^{-9}에서 −27.0 dBm이었다. 향후, 스펙트럼 반전법을 이용한 색분산 보상법이 실용화되기 위해서는 편광에 무관한 스펙트럼 반전법이나 비선형성 매질에 관한 연구가 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

[1] R. Heidemann, B. Wedding, and G. Veith, Proc. IEEE, **81**, 1558 (1993).
[2] Y.K. Park, P.D. Yeates, J.-M.P. Delavaux, O. Mizuhara, T.V. Nguyen, L.D. Tzeng, R.E. Tench, B. W. Hakki, C.D. Chen, R.J. Nuyts, and K. Ogawa, IEEE Photon, Technol. Lett., **7**, 816 (1995).
[3] G. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics,* (Academic Press, 1989).
[4] A.H. Gnauck, R.M. Jopson, and R.M. Derosier, IEEE Photon. Technol. Lett., **5**, 663 (1993).
[5] G.P. Agrawal, Opt. Lett., **12**, 260 (1987).
[6] M.C. Tatham, G. Sherlock, and L.D. Westbrook, IEEE Photon. Technol. Lett., **5**, 1303 (1993).
[7] K. Inoue, IEEE J. Lightwave Technol., **10**, 1553 (1992).
[8] J. Zhou, N. Park, J. Vahala, M.A. Newkirk, and B.I. Miller, IEEE Photon. Technol. Lett., **6**, 984 (1994).
[9] R.M. Jopson, A.H. Gnauck, P.P. Iannone, and R.M. Derosier, OFC94 Technical Digest, PD22 (1994).
[10] M.C. Tatham, L.D. Westbrook, G. Sherlock, and D.M. Spirit, ECOC 94 Technical Digest, 733 (1994).
[11] K. Inoue, T. Hasegawa, and H. Toba, IEEE Photon. Technol. Lett., **7**, 327 (1995).
[12] K.O. Hill, D.C. Johnson, B.S. Kawasaki, and R.I. MacDonald, J. Appl. Phys, **49**, 5098 (1978).

Transmission of 10 Gb/s Signal over 200 km of Non-dispersion Shifted Fiber by Using Mid-span Spectral Inversion

Sang-Soo Lee and Chang-Hee Lee
Lightwave Communications Section, Electronics and Telecommunications Research Institute, 161 Kajong-Dong, Yusong-Gu, Taejeon 305-606

(Received: November 24, 1995)

We have demonstrated 200 km non-dispersion shifted fiber(NDSF) transmission of 10 Gb/s signal by using mid-span spectral inversion(MSSI) method as a dispersion compensation technique. We have used four-wave mixing process in dispersion shifted fiber(DSF) to generate a spectrum inverted signal. The spectral inversion efficiency of −26.7 dB and signal to noise ratio of 23.0 dB have been achieved. The measured sensitivities at 10^{-9} bit error rates (BER) were −28.0 dBm in back to back configuration and −27.0 dBm after transmission of 200 km NDSF.