

## 10 Gb/s 신호의 광학적 신호대 잡음비와 색분산 보상에 따른 아이 마진 특성

이상수 · 한정희 · 이동호 · 주무정  
한국전자통신연구원 교환전송기술연구소

김민규  
광운대학교 전자공학과

(1998년 9월 8일 받음, 1999년 3월 24일 수정본 받음)

광증폭 증계방식의 10 Gb/s 광링크에서 신호의 광학적 신호대 잡음비 및 색분산 보상에 따른 아이 마진 특성을 실험적으로 조사하였다. 실험 결과 시스템 적용을 위해서는 최소한 25 dB 이상의 광학적 신호대 잡음비가 요구됨을 알 수 있었다. 그리고 단일모드 광섬유에서 발생하는 색분산을 보상하기 위해 송신기의 프리 처핑과 색분산 보상용 광섬유를 함께 사용하는 광링크에서 잉여 색분산이 0~+935 ps/nm인 경우 최적의 아이 열림과 수신감도를 얻을 수 있었다.

### I. 서 론

현재 광전송 시스템에서는 장거리 전송을 위해 3 R (retiming, reshaping, regeneration) 기능을 갖는 재생형 증계기 대신 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(erbium doped fiber amplifier; EDFA)를 사용하는 것이 보편화되었다.<sup>[1]</sup> 그렇지만 EDFA는 1 R(reshaping) 기능만을 수행하기 때문에 신호와 함께 증폭된 자연방출광(amplified spontaneous emission; ASE) 성분의 잡음도 함께 증폭이 되므로 신호의 광학적 신호대 잡음비가 나빠지게 된다. 따라서 EDFA를 다단으로 연결하여 사용할 경우 전송된 신호의 광학적 신호대 잡음비가 수신된 신호의 품질을 결정하는 새로운 요인이 되었다.<sup>[2,3]</sup>

한편 EDFA의 사용으로 광섬유의 손실에 의한 문제는 해결되었으나, 또 다른 제한 요인인 색분산은 전송속도가 증가함에 따라 그 영향이 크게 나타나므로<sup>[4]</sup> 초고속 광링크에서 전송거리를 제한하는 주요인이 되고있다. 색분산에 의한 제한을 해결하기 위해 분산천이 광섬유가 개발되어 사용되고 있지만, 새로이 광섬유를 포설하는데에는 막대한 비용이 소요되기 때문에 기존의 단일 모드 광섬유와 색분산 보상법을 함께 사용하는 방법이 널리 연구되어 왔다.<sup>[5-7]</sup>

따라서 광증폭기를 사용하는 단일 채널의 초고속 광링크에서는 신호의 광학적 신호대 잡음비와 함께 색분산이 장거리 전송을 제한하는 가장 큰 요인이 되고 있으며, 이들의 영향을 모두 고려하여 광링크를 설계해야 한다. 특히 상용화를 목적으로 하는 광전송 시스템의 경우 수신감도를 높이는 것 보다는 아이 마진(eye margin)이 최대가 되도록 하는 것이 장기적인 신뢰성 확보 및 견고한 시스템 설계 측면에서 중요한 의미를 갖는다.

본 논문에서는 단일 채널 초고속 광링크 설계 기술의 확보

를 위해 신호의 광학적 신호대 잡음비와 색분산의 영향을 동시에 고려하여 10 Gb/s 신호의 아이 마진 특성을 실험적으로 조사하였다. 이를 위해 신호의 광학적 신호대 잡음비 변화에 대한 판별전압 마진과 위상마진을 측정하였다. 그리고 송신기의 프리 처핑(pre-chirping)과 색분산 보상용 광섬유를 함께 사용하여 색분산을 보상할 때 색분산 보상에 따른 판별전압 마진, 위상 마진 및 수신감도 특성에 대하여 논의하였다.

### II. 광학적 신호대 잡음비에 대한 아이 마진 특성

광증폭 증계방식의 광링크에서 EDFA를 다단으로 연결하여 손실을 보상해줄 경우 증폭된 자연 방출광 잡음의 누적으로 인해 신호의 광학적 신호대 잡음비가 나빠지게 된다. 이때 EDFA의 다단 연결에 따른 광학적 신호대 잡음비 특성은 (식 1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[8]</sup>

$$(OSNR_{Nth})^{-1} = \sum_{j=1}^n \frac{2h \nu N_j^{sp} B_0}{P_j} \quad (1)$$

위 식에서  $h$ 는 플랑크 상수,  $\nu$ 는 신호광의 주파수,  $N_j^{sp}$ 는  $j$  번째 광증폭기의 잡음인자(noise factor),  $B_0$ 는 광학필터의 대역폭,  $P_j$ 는  $j$  번째 광증폭기의 입력세기를 각각 나타낸다. 그림 1에 광증폭기를 다단 연결하였을 때 파장이 1,550 nm, 잡음인자가 1.5, 광학필터의 대역폭이 0.1 nm인 경우의 광학적 신호대 잡음비 특성을 나타내었다. 광증폭기 10 개를 다단 연결한 경우에는 광증폭기를 하나만 사용한 경우에 비해 광학적 신호대 잡음비가 10 dB 정도 감소함을 알 수 있다. 광증폭기의 잡음인자, 광학필터의 대역폭이 결정되면 신호의 광학적 신호대 잡음비는 광증폭기의 다단 연결 개수, 입력 세기에 따른 함수로 표현된다. 그러므로, 요구되는 광학적 신호대 잡

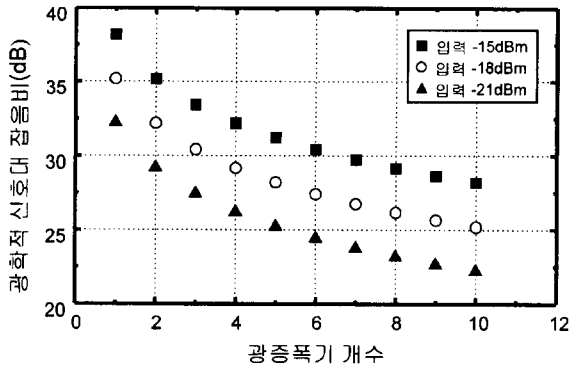


그림 1. 광증폭기의 다단 연결에 따른 광학적 신호대 잡음비 특성.

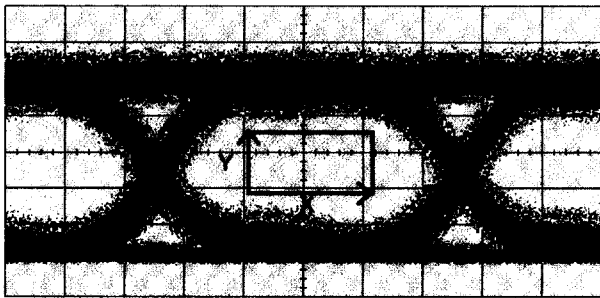


그림 2. 아이 마진의 정의 X: 위상 마진, Y: 판별전압 마진.

음비에 의해 광증폭기의 중계거리 및 최대 전송거리가 결정되기 때문에 광학적 신호대 잡음비에 대한 전송 특성을 잘 이해해야만 한다.

한편 상용 광전송 시스템에서는 장기적인 면에서의 신뢰성이 확보되어야 하기 때문에 수신기의 수신감도 보다는 오히려 수신단에서의 아이 마진이 더 의미를 갖는다. 아이 마진은 그림 2와 같이 수신기의 데이터 재생부로 입력되는 펄스에 대해 주어진 비트 오류를 얻을 수 있는 진폭(y축)과 시간(x축)의 최대 허용 범위로 정의된다. 즉 아이 마진이 크다는 것은 시스템의 열화나 외부 환경의 변화 등에 의해 판별 지점이 변하거나 색분산 등에 의해 펄스의 모양이 변하더라도 주어진 비트 오류를 유지할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 광증폭 중계방식을 사용하는 광링크에서는 광학적 신호대 잡음비에 따른 아이 마진 특성을 이해하는 것이 매우 중요하다.

10 Gb/s 신호의 광학적 신호대 잡음비에 따른 아이 마진 특성을 알아 보기 위해 그림 3과 같이 광링크를 구성하였다.

광송신기는 파장이 1,557.36 nm인 DFB 레이저 다이오드와 LiNbO<sub>3</sub> 마하 젠더 간섭계형 외부변조기로 구성되어 있다. 외

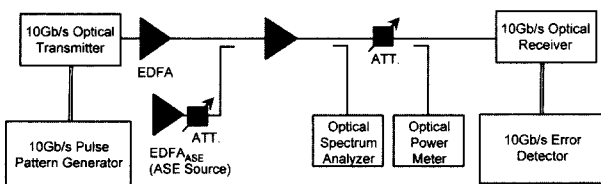


그림 3. 광학적 신호대 잡음비 변화에 따른 아이 마진 특성 측정을 위한 광링크 구성도.

부변조기는 10Gb/s 펄스 패턴 발생기(pulse pattern generator)로부터 출력되는 10 Gb/s NRZ(non-return to zero) 신호 (PRBS 2<sup>23</sup>-1, Vp-p=1 V)에 의해 구동되며, 처평계수는 -1로 하였다. LiNbO<sub>3</sub> 외부변조기의 출력은 EDFA에 의해 +10 dBm으로 증폭된 후 방향성 결합기를 사용하여 ASE 잡음원으로 사용되는 EDFA<sub>ASE</sub>의 출력과 다중화된다. 이때 EDFA<sub>ASE</sub>의 출력단에 광감쇠기를 사용하여 ASE 출력 레벨을 조절하여 수신기로 입력되는 10 Gb/s 신호의 광학적 신호대 잡음비를 조절하도록 하였다. 광학적 신호대 잡음비는 광 스펙트럼 분석기의 분해능을 0.1 nm로 하고, 신호 레벨과 ASE 레벨 간의 차이로서 정의하였다. 신호는 10 Gb/s 수신기로 입력되어 데이터와 클럭이 재생되며, 이를 10 Gb/s 에러 검출기(error detector)로 입력시켜서 비트 오류율(bit error rate, BER)을 측정하도록 하였다. 사용된 수신기는 PIN-HBT 전치 증폭기, 리미팅 증폭기, 클럭 추출 및 데이터 재생부(clock extraction and data regeneration)로 구성되어 있다.<sup>[8,9]</sup> 본 논문에서는 수신기의 클럭 추출 및 데이터 재생부의 디 플립플롭(D/flip-flop)으로 입력되는 신호의 판별 레벨을 조절하여 판별전압 마진을 측정하였고, 또한 클럭의 위상을 조절하여 위상 마진을 측정하도록 하였다.

10 Gb/s로 변조된 신호의 광학적 신호대 잡음비를 변화시키면서 비트 오류 1×10<sup>-9</sup>에서 측정한 아이 마진 특성을 그림 4에 나타내었다. 본 실험에서 사용된 수신기의 클럭 추출 및 데이터 재생부의 입력 신호는 그림 2와 같은 리미팅 증폭기의 출력이며, 최대 800 mV의 진폭을 갖는 신호가 입력된다. 따라서 이상적인 경우 신호 "1"에 대해 800 mV, 신호 "0"에 대해서는 0 mV를 나타내게 된다.

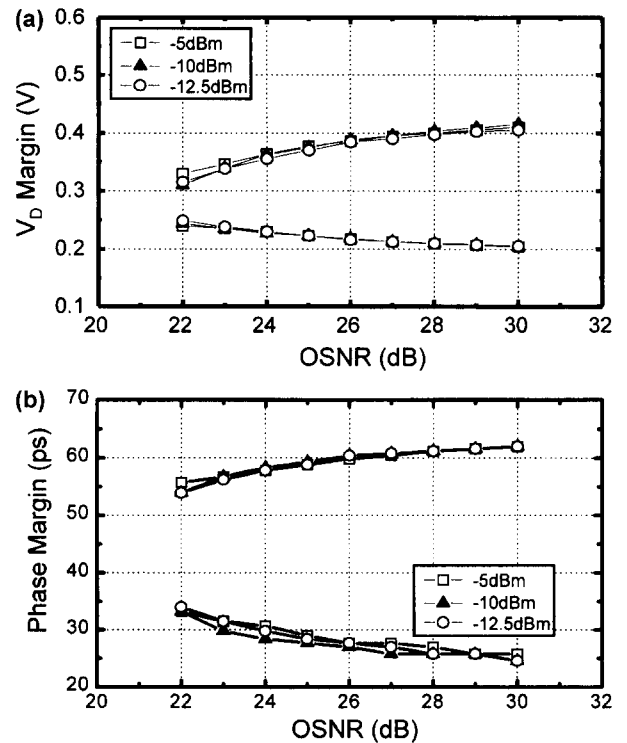


그림 4. 광학적 신호대 잡음비에 변화에 대한 아이 마진 특성.

그림 4-a에는 신호의 광학적 신호대 잡음비를 22~30 dB까지 변화시켜 가면서 측정된 판별전압 마진을 나타내었다. 이때 수신기 입력세기는 -5, -10, -12.5 dBm으로 하였다. 먼저 수신기 입력세기에 대한 판별전압 마진의 경우에는 거의 동일한 것으로 나타났다. 이는 -5~-12.5 dBm의 수신기 입력세기에 대해 리미팅 증폭기가 정상적으로 동작하고 있으며, 이 영역에서는 수신기의 PIN-HBT 전치 증폭기에서 발생하는 열잡음의 영향을 무시할 수 있음을 의미한다. 광학적 신호대 잡음비에 대한 판별전압 마진은 광학적 신호대 잡음비가 30 dB인 경우 200 mV로 최대였으며, 광학적 신호대 잡음비가 감소함에 따라서 판별전압 마진도 함께 감소하였다. 광학적 신호대 잡음비 22 dB에서는 판별전압 마진이 약 50 mV로 나타났다. 그러므로 광학적 신호대 잡음비가 22 dB인 경우에도 비트 오류  $1 \times 10^{-9}$ 을 얻을 수 있으나, 이때의 판별전압 마진은 광학적 신호대 잡음비가 30 dB인 경우에 비해 1/4로 감소함을 알 수 있다. 판별전압 마진이 작은 경우에는 주위 환경의 변화나 시스템의 열화에 의해 판별 레벨이 조금만 변화하여도 원하는 비트 오류를 얻을 수 없기 때문에 시스템 설계 시 판별전압 마진을 최대로 하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 시스템 동작 개시 시점에서 가져야 할 마진을 고려하여 판별 전압 마진에 대해 1 dB 아이 잠김(eye closure) 페널티<sup>[10]</sup>를 적용하였다. 따라서 최대 판별전압 마진인 200 mV의 80% 수준인 160 mV를 최소로 확보해야 할 판별마진의 한계로 결정하였다. 그러므로 광학적 신호대 잡음비 측면에서 보면 최소 25 dB 이상이 되어야만 이 조건을 만족함을 알 수 있다.

그림 4-b에는 비트 오류  $1 \times 10^{-9}$ 을 얻을 수 있는 위상 마진의 범위를 나타내었다. 위상 마진은 판별전압을 최적값으로 고정시킨 후 재생된 클럭의 위상을 변화시켜 가면서 측정하였다. 최대 위상마진은 광학적 신호대 잡음비 30 dB에서 35~37 ps였으며, 광학적 신호대 잡음비가 감소함에 따라 함께 감소하였다. 그리고 수신기 입력세기 -5~-12.5 dBm에 대해 거의 같은 위상마진을 나타내었다. 판별 전압 마진의 한계로 결정한 광학적 신호대 잡음비 25 dB에서 위상마진은 30 ps 이상으로 최대값의 약 80 %를 나타내었다.

### III. 색분산 보상에 따른 아이 마진 특성

본 절에서는 색분산 보상법으로 송신기의 프리 처핑과 색분산 보상용 광섬유를 함께 사용하는 경우 아이 마진 특성과 이상적인 색분산 보상 비율에 관하여 논의하였다.

실험을 위해 그림 5와 같이 광링크를 구성하였다. 앞의 실험

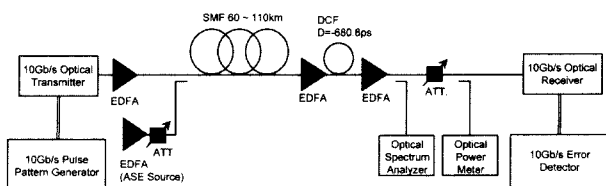


그림 5. 색분산 보상에 따른 아이 마진 특성 측정을 위한 광링크 구성도.

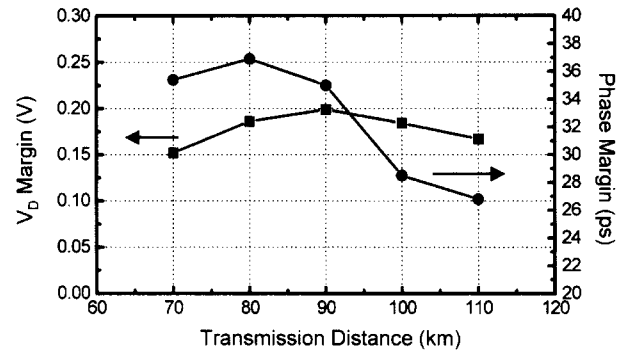


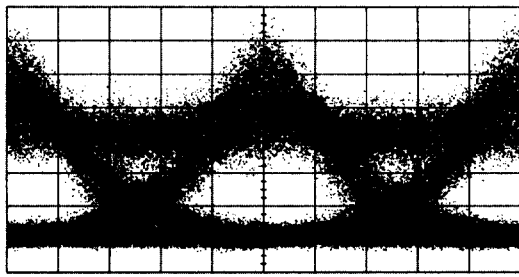
그림 6. 전송거리에 따른 아이 마진 특성.

험에서 사용된 그림 3의 광링크 구성에서 전송용 광섬유로 단일모드 광섬유를 사용한 점과 색분산 보상을 위해 색분산 보상용 광섬유가 사용된 점이 다르다. 색분산 보상용 광섬유의 색분산 계수는 전송 파장인 1,557.36 nm에서 -680 ps/nm로서 단일모드 광섬유 40 km에서 발생하는 색분산을 보상할 수 있는 양이다. 그리고 전송용 단일모드 광섬유의 길이를 70 km에서 110 km까지 10 km의 단위로 증가시키면서, 비트 오류  $1 \times 10^{-9}$ 에서의 판별전압 마진과 위상 마진을 측정하였다.

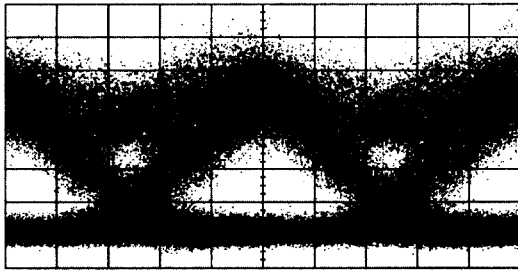
그림 6에는 신호의 광학적 신호대 잡음비를 25 dB, 수신기 입력 세기를 -12 dBm으로 고정시킨 후 전송 거리를 변화시켜 가면서 측정된 아이 마진 특성을 나타내었다. 판별전압 마진의 경우 단일모드 광섬유 70 km에 대해 155 mV 정도로 나타났다. 이는 앞서 수행한 광섬유를 사용하지 않고 광학적 신호대 잡음비 25 dB에서 측정된 판별전압 마진과 동일한 것이다. 본 실험에서 사용된 색분산 보상법은 선형 보상법이므로 결국 40~70 km의 단일 모드 광섬유에 대해서는 동일한 판별전압 마진을 갖는 것으로 해석할 수 있다. 판별전압 마진은 전송거리가 증가함에 따라 증가하여 단일모드 광섬유 90 km의 경우 200 mV로 최대를 나타내다가 다시 감소하여 단일모드 광섬유 110 km의 경우에는 100 mV를 나타내었다. 위상 마진의 경우 단일모드 광섬유 70 km의 경우에 35 ps를 나타내었다. 위상마진은 전송거리가 증가함에 따라 증가하여 단일모드 광섬유 80 km에서 38 ps로 최대를 나타내다가 다시 감소하여 단일모드 광섬유 110 km의 경우에는 26 ps를 나타내었다.

앞서 언급한 바와 같이 판별전압 마진의 한계를 160 mV, 위상마진의 한계를 30 ps라고 할 때 이들을 동시에 고려한 최적의 전송거리는 단일모드 광섬유 40~95 km가 됨을 알 수 있다. 이 경우 색분산 보상용 광섬유에 의해 40 km가 보상되기 때문에 실제 프리 처핑에 의한 최적의 색분산 보상은 단일모드 광섬유 0~55 km가 됨을 알 수 있다.

그림 7에는 광전치 증폭기 출력단에서 측정된 광학적 아이 패턴을 나타내었다. 신호의 광학적 신호대 잡음비는 모두 25 dB로 하였다. 그림 7-a의 경우는 단일모드 광섬유 80 km와 색분산 보상용 광섬유를 사용한 경우로써 이상적인 색분산 보상이 되어 아이 열림이 최대가 됨을 알 수 있다. 그림 7-b의 경우는 단일모드 광섬유 110 km와 색분산 보상용 광섬유를



(a) SMF 80km + DCF 인 경우의 아이 패턴



(b) SMF 110km + DCF 인 경우의 아이 패턴

그림 7. 색분산 보상에 따른 아이 패턴 특성.

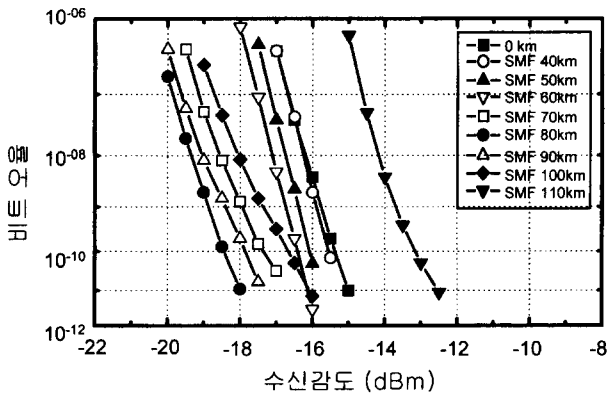


그림 8. 수신감도 특성.

사용한 경우로써 색분산 보상이 부족하여 아이 열림이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 7의 아이 패턴은 광전치 증폭기 출력단에서 측정된 광학적 아이 패턴으로써 이 신호가 리미팅 증폭기로 입력되어 리미팅 된 후 클럭 추출 및 데이터 재생부로 입력된다.

그림 8에는 단일모드 광섬유 40~110 km에 대해 측정한 수신감도를 광섬유를 사용하지 않은 경우의 수신감도와 함께 나타내었다. 수신감도는 단일모드 광섬유 80 km를 전송하는 경우 비트 오류  $1 \times 10^{-9}$ 에서  $-19.0$  dBm으로 가장 좋았으며, 단일모드 광섬유 40~100 km까지는 광섬유를 사용하지 않은 경우 보다 좋은 것으로 나타났다. 이 결과는 그림 6에 나타난 아이 마진 특성의 결과와 잘 일치하는 것이다. 반면에 단일모드 광섬유 110 km 전송의 경우 수신감도는  $-13.5$  dBm으로 나타났으며, 이 경우에는 편별전압 마진과 위상 마진이 모두 한계를 벗어났기 때문에 수신감도가 나빠지는 것으로 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 초고속 광링크 설계 기술의 확보를 위해 광학적 신호대 잡음비와 색분산 보상에 따른 10 Gb/s 신호의 아이 마진 특성에 관하여 실험적으로 조사하였다. 신호의 광학적 신호대 잡음비에 대한 아이 마진 특성에 대해 조사한 결과 시스템 적용을 위해서는 25 dB 이상의 광학적 신호대 잡음비가 되어야 했다. 그리고 송신기의 프리 처핑(처핑 계수 -1)과 색분산 보상용 광섬유를 사용하여 색분산을 보상하는 경우 이상적인 색분산 보상 거리(최대 전송 거리-색분산 보상용 광섬유에 의한 보상 거리)는 0~55 km가 됨을 확인하였다. 이는 1,550 nm 영역에서 단일모드 광섬유의 색분산 계수를 +17 ps/nm.km로 볼 때 0~+935 ps/nm의 색분산에 해당한다.

단일모드 광섬유를 사용하는 단일 채널 광링크에서는 색분산 보상용 광섬유를 사용하거나 처프된 광섬유 회절 격자 등을 사용하여 단지 색분산만을 보상하고 있다. 그렇지만 채널당 전송속도가 10 Gb/s 이상인 다채널 광링크에서는 색분산과 함께 색분산 기술기의 보상이 요구된다. 본 논문에서 측정된 아이 마진 및 색분산 보상 마진을 이용하면 색분산 기술기에 의해 발생하는 단파장 채널과 장파장 채널 간의 색분산 차이가 935 ps/nm 이내인 다채널 광링크의 설계에도 적용이 가능하다.

#### 감사의 글

본 연구는 HAN/B-ISDN 프로젝트의 일환으로 수행되었으며, 연구 수행에 도움을 주신 김재근 박사님과 박창수 박사님께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] H. K. Kim, S. Y. Park, D. H. Lee, and C. S. Park, ETRI J., **20**, 28 (1998).
- [2] ITU-T Contribution COM15-31E (1997).
- [3] C. D. Chen, J.-M. D. Delavaux, B. W. Hakki, O. Mizuhara, T. V. Nguyen, R. J. Nuyts, K. Ogawa, Y. K. Park, C. S. Skolnick, R. E. Tench, J. Thomas, L. D. Tzeng, and P. D. Yeats, OFC 94 Technical Digest, PD27, 1994, San Jose, U.S.A.
- [4] Y. K. Park, O. Mizuhara, L. D. Tzeng, J.-M. P. Delavaux, T. V. Nguyen, M.-L. Kao, P. D. Yeats, and J. Stone, IEEE Photon Technol. Lett., **5**, 79 (1993).
- [5] Y. K. Park, P. D. Yeats, 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).
- [6] W. H. Loh, R. I. Laming, N. Robinson, A. Cavaciuti, F. Vanietti, C. J. Anderson, M. N. Zervas, and M. J. Cole, IEEE Photon Technol. Lett., **8**, 944 (1996).
- [7] Naoya Henmi, Tomoki Saito, and Tomoko Ishida, IEEE J. Lightwave Technol., **12**, 1707 (1994).
- [8] 광통신, 박문수, 대한전자공학회 논문지. **34-D**, 15 (1997).

[9] 송재호, 유태환, 박문수, 한국통신학회 하계종합학술대회 논문집, 925 (1997).

[10] Nobuo Suzuki, and Takeshi Ozeki, *J. Lightwave Technol.*, **11**, 1486 (1993).

**Eye margin characteristics of 10 Gb/s signals to the variation of optical signal to noise ratio and dispersion compensation**

Sang-Soo Lee, Jung-Hee Han, Dong-Ho Lee and Moo-Jung Chu  
*Switching & Transmission Technology Lab.*

*Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejon 305-350, Korea*

Min-Kyu Kim

*Dept. of Electronic Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea*

(Received September 8, 1998, Revised manuscript received March 24, 1999)

We have experimentally investigated the eye margin characteristics of intensity modulated 10 Gb/s NRZ signals in optically amplified systems depending on optical signal-to-noise ratio and chromatic dispersion. For the practical system application, the minimum optical signal-to-noise ratio was 25 dB. We utilized the negative chirped transmitter and a dispersion compensation fiber to compensate the chromatic dispersion in single mode fiber. We found the optimum eye opening and receiver sensitivity in case of the residual dispersion of 0~+935 ps/nm.