

광섬유에 유도되는 stimulated Brillouin scattering 현상이 광전송시스템에 미치는 영향 측정 및 제거*

김향균 · 이창희

전자통신연구소, 광파통신연구실

한 정 희

광통신연구실

(1995년 11월 1일 받음)

광섬유에 유도되는 stimulated Brillouin scattering 현상이 광전송시스템에 미치는 영향을 전송실험을 통해 측정하였고, 그 제거실험 및 결과에 대해 기술하였다. 외부변조방식의 2.5 Gb/s 광전송에서 분산천이 광섬유의 경우 약 10 dBm의 입사광세기에서 stimulated Brillouin scattering 현상이 유도되기 시작하였으며, 이 때문에 전송오율이 증가하였다. 광원의 선폭을 200 MHz로 확대함으로써 송신출력을 15 dBm으로 높여도 stimulated Brillouin scattering 현상이 제거됨을 관측하였다.

I. 서 론

광전송시스템의 성능은 전송거리와 전송용량(bit rate)의 곱으로 나타낼 수 있으며, 이는 전송시스템을 구성하고 있는 각 부분들, 즉 광송수신기, 광선로의 특성들에 의해 결정된다. 저속(low bit rate), 단거리 광통신에서 광선로는 광신호를 전달하는 단순한 광 통로로만 다룰 수 있으나, 초고속 장거리 광통신에서는 광섬유의 색분산이나 비선형 현상등 전송시스템의 성능에 영향을 주는 요인이 증가한다. 특히, 에르븀 첨가 광증폭기의 개발로 전송 출력이 증가하면서 광섬유의 비선형 현상에 의한 신호의 왜곡은 전송시스템의 성능을 결정하는 중요한 요인이 되고 있다.

광섬유에 유도되는 비선형 현상 중의 하나인 유도 브릴루앙 산란(Stimulated Brillouin Scattering, 이하 SBS) 현상은 매질의 phonon(acoustic phonon)과 빛의 상호작용에 의해 입사광이 산란되는 현상으로, 산란광, 신호광, phonon의 위상정합조건에 의해서 신호광이 진행하는 방향과 반대방향으로 산란이 가장 잘 일어난다.^[1] SBS 현상은 그 입계 광세기가 수 mW로 매우 낮기 때문에 전송시스템에 미치는 영향도 심각하다.^[2] 따라서

고출력의 신호광을 광섬유에 입사시켜서 광전송시스템의 전송거리를 길게하기 위해서는 SBS 현상에 의한 신호의 왜곡을 제거해야 한다.

본 논문에서는 2.5 Gb/s 광전송 실험을 통하여 분산천이 광섬유와 비분산천이 광섬유에 유도되는 SBS 현상에 의한 신호의 왜곡과 에러율의 증가를 관측하였다. SBS의 영향을 감소시키기 위해 반도체 레이저를 소신호로 주파수변조하여 발진선폭을 증가시키는 방법을 이용하여 광섬유에 결합시키는 광의 세기를 15 dBm 이상 증가시킬 수 있음을 보였다.

II. SBS 현상에 의한 전송오율 증가

광섬유에서의 SBS 현상이 광전송시스템에 미치는 영향을 측정하기 위해서 2.5 Gb/s 광전송실험을 통하여 분산천이 광섬유와 비분산천이 광섬유에 유도되는 SBS 현상에 의한 신호의 왜곡과 에러율의 증가를 관측하였다. 실험장치는 그림 1에 나와있다. 송신부는 DFB LD와 Mach-Zehnder형 LiNbO3 외부변조기를 이용하여 2.5 Gb/s로 변조하였다. 이때 LD는 변조를 하지 않았을 때의 선폭이 각각 3 MHz와 40 MHz인 두 가지를 이용하였다. 에르븀 첨가 광전력 증폭기의 출력광 세기를 변화시켜 광섬유로 입사되는 광세기를 조정하였고, 광섬유를 지난 신호광은 수신기 모듈로 검출하여 bit error rate(BER)를

*본 연구는 HAN/BISDN 과제중 10 Gb/s SDH 광전송 시스템 개발과제의 지원을 받아 수행하였습니다.

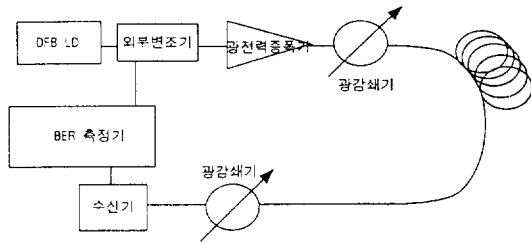


그림 1. 실험장치도.

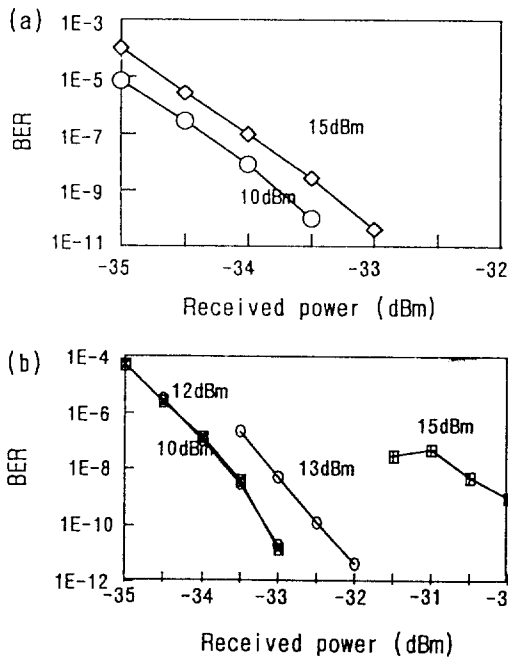


그림 2. 입사광 세기에 대한 수신감도의 변화
(a) 비분산천이 광섬유, (b) 분산천이 광섬유

측정하였다.

그림 2는 100 km의 분산천이 광섬유(a)와 100 km의 비분산천이 광섬유(b)를 지난 후의 BER로, 광섬유로 입사되는 광세기를 변화시켜가며 측정한 결과이다. 이때 광원은 선폭이 40 MHz인 LD를 이용하였고 송신기와 수신기만을 연결하였을 때 수신감도는 약 -34 dBm(BER 10^{-9})이다. 분산천이 광섬유의 경우 입사광세기가 약 12 dBm일 때 BER이 급격히 나빠졌으며 약 15 dBm에서는 모든 수신 광세기에 대해 약 2×10^{-8} 의 BER을 나타냈다. 단일모드 광섬유에서는 약 15 dBm의 입사광세기에서 SBS에 의한 penalty가 약 0.5 dB로 분산천이 광섬유에 비해 SBS에 의한 BER 증가가 심각하지 않았다.

선폭이 3 MHz인 LD를 이용하였을 때는 분산천이 광섬유의 경우 10 dBm의 입사광 세기에서 SBS에 의한

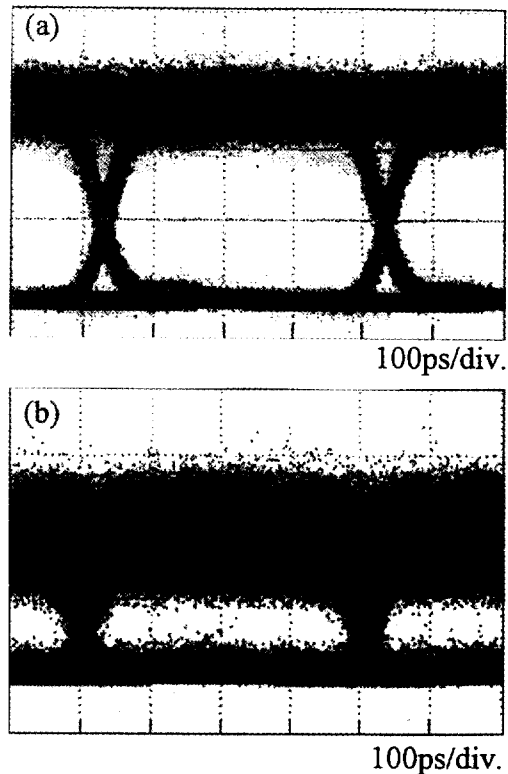


그림 3. SBS 현상에 의한 eye pattern의 변화
(a) SBS 현상이 일어나기 전, (b) SBS 현상이 일어난 후

BER 악화가 뚜렷이 나타나기 시작하였다.

SBS에 의한 BER 증가의 원인을 알아보기 위해 광섬유를 지난 후 신호광의 eye pattern을 관측하였다. 그림 3(a)와 (b)는 SBS가 일어나기 전과 후의 eye pattern을 나타낸다. SBS가 일어난 후에 수신되는 eye pattern은 그 opening이 SBS 현상이 일어나기 전보다 현저히 줄어들며 이는 수신되는 광세기를 증가시켜도 개선되지 않는다. 이 때문에 SBS 현상이 일어난 후 BER 곡선에는 error floor가 나타난다. 또한 “1” 상태의 광세기가 천천히 변하며, 이에 따라서 BER도 변화함을 관측하였다. 이로부터 SBS 효과에 의한 BER 증가의 원인은 광섬유에서 신호광의 무작위적인 반사 때문에 “1”상태의 잡음이 증가하기 때문임을 알 수 있다.

III. SBS 효과 제거

1. SBS 임계 광세기 측정

SBS 현상의 역제는 SBS가 일어나는 임계 광세기를

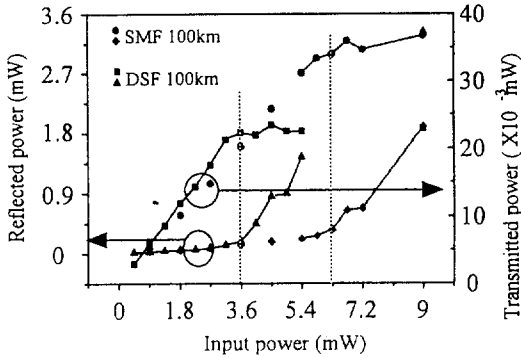


그림 4. 입사광세기에 대한 반사광과 투과광의 세기변화

전송하고자 하는 광출력보다 높게 함으로서 가능하다. 광원이 연속발전 상태일 때 SBS 현상이 일어나는 임계 광세기는 일반적으로 다음과 같이 표현된다.^[3]

$$P_{th,SBS} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}$$

여기서 K 는 편광 factor로서 반사광들 사이에 편광 correlation에 따라 $1 < K < 2$ 의 값을 갖는다. A_{eff} , g , $\Delta\nu_B$, $\Delta\nu_p$, $L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha L))/\alpha$ 는 각각 유효 모드 면적(mode field area), SBS 이득, SBS 이득대역폭, 신호광의 대역폭, 유효거리를 나타낸다. 실리카 광섬유에서의 SBS 이득은 대략 $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{W}^{[1]}$ 로서, 신호광의 파장에는 거의 무관한 값을 갖는다. 유효거리는 광섬유의 손실에 관계되는 값으로 광섬유의 손실이 대략 0.25 dB/km이므로 유효 거리는 약 17.4 km가 나온다.

그림 4는 분산천이 광섬유와 비분산천이 광섬유에서 SBS의 임계광세기를 측정한 것으로 선폭이 3 MHz인 LD를 이용하여 연속발전의 상태에서 측정한 것이다. SBS가 일어나기 시작하는 임계광세기는 분산천이 광섬유에서 약 3.6 mW이고 단일모드 광섬유에서 약 6.8 mW이다. 일단 SBS가 일어나기 시작하면 입사 광세기가 증가하여도 투과되는 신호 광세기는 증가하지 않는다. 반사된 산란광은 단일모드 광섬유와 분산천이 광섬유 모두 신호광과 약 10 GHz의 주파수 차이를 보였고, 산란광의 대역폭은 약 30 MHz였다. 분산천이 광섬유보다 일반 단일모드 광섬유의 SBS 임계광세기가 큰 것은 위 식으로부터 알 수 있는 것처럼 각 광섬유의 유효 모드 직경이 차이이기 때문이다.

BER 측정에서 나타난 임계광세기와 연속발전 상태의 광원을 이용하여 측정한 임계광세기가 다른 것은 측정에

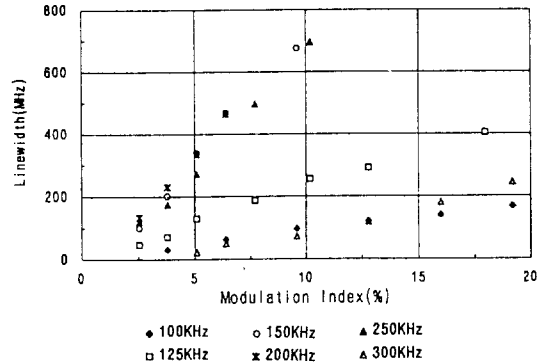


그림 5. LD의 주파수 응답특성

이용된 광원의 특성이 다르고, 또한 광원에 진폭변조를 가하였을 때 변조로 인하여 임계 광세기가 연속발전상태일 경우보다 낮아지기 때문이다.^[6]

2. SBS 제거실험

SBS가 유도되는 임계광세기를 높이는 것은 위 식에 나타난 임계광세기를 결정하는 각 항목들을 조절함으로써 가능하다. 이제까지 보고된 방법들로는, 신호광의 대역폭을 증가시키거나,^[2,5] 광섬유 중간 중간에 아이솔레이터를 놓아 유효거리를 짧게 한다. 실제 시스템에서는 후자의 방법은 사용하기 불가능 하며, 억제 효율도 제한된다. 본 연구에서는 신호광원의 대역폭을 넓혀서 SBS 현상을 제거하였다.

LD의 bias 전류를 소신호로 변조해 주면 출력의 진폭 변조와 함께 전류밀도 변화에 의한 굴절률 변화때문에 주파수 변조가 유도되어 발진 스펙트럼이 넓어진다. 이러한 특성을 이용하여 LD의 발진 선폭을 증가시켜서 SBS를 억제시킬 수 있다. 본 SBS 억제 실험에 사용된 송신기용 LD는 선폭이 40 MHz이고 bias전류(I_{bias})는 33 mA, 발진임계전류(I_{th})는 약 8 mA이다. SBS 제거실험은 먼저 LD의 주파수 응답 특성을 측정하고, 선폭확대 효율이 가장 좋은 주파수에서 변조 진폭을 변화시켜가며 SBS 제거현상을 관측하였다.

LD는 변조주파수에 따라 주파수 변조폭이 달라진다.^[4] 따라서 SBS 제거를 위해서는 광출력 변조에 대한 선폭 확대의 비가 최대가 되는 주파수로 변조하여, 광출력변조에 의한 penalty를 최소화하여야 한다. 그림 5는 실험에 사용된 LD의 주파수 응답특성을 나타내는 것으로 선폭 확대 효율이 가장 좋은 주파수 대역은 150~250 kHz이다. 따라서 이 LD를 이용하여 SBS를 억제하기 위해서는 150~250 kHz의 주파수로 변조하여야 한다.

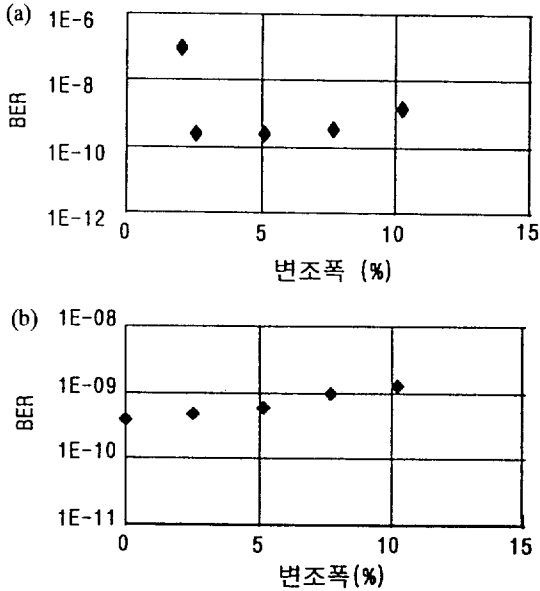


그림 6. LD에 가한 전류의 변조폭에 대한 SBS 억제 특성

(a) 15 dBm의 광원이 DSF 100 km를 진행한 후의 BER 특성. (b) LD 전류 변조에 의한 penalty

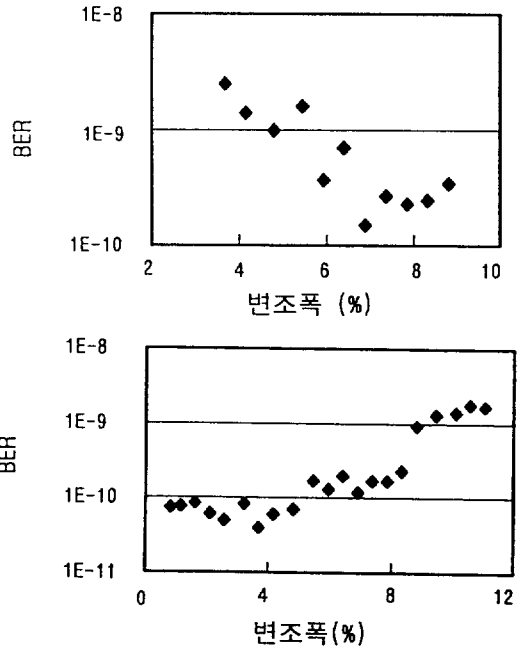


그림 7. 주파수 응답특성이 다른 LD의 전류 변조에 의한 SBS 억제 특성

(a) 15 dBm의 광원이 DSF 100 km를 진행한 후의 BER 특성, (b) LD 전류 변조에 의한 penalty

100 km의 분산천이 광섬유로 약 15 dBm의 신호광이 입사할 때 변조주파수(f_M)와 진폭(I_M)을 변화시켜가며 BER을 측정하였다. 이때 수신광세기는 -33.5 dBm으로 고정하였으며, 변조를 가하지 않고 송신기를 수신기에 바로 연결하여 BER을 측정하였을 때, -33.5 dBm의 수신광 세기에서 BER은 약 2×10^{-10} 였다. 그림 6(a)는 100 km의 분산천이 광섬유로 15 dBm의 신호광이 입사될 때, 200 kHz의 변조주파수에서 변조폭($I_M/(I_{bias} \sim I_{th}) \times 100, \%$)을 변화시켜가며 측정한 BER변화이다. 약 2.5% 이상에서 SBS효과가 제거됨을 보이나, 진폭을 더 증가시키면 다시 BER이 악화된다. 이는 변조의 폭이 커질 때 광출력 자체의 진폭변조가 무시 못할 수준에 이르기 때문이다. 변조에 의한 송신기 자체의 penalty를 측정한 결과가 그림 6(b)에 있다. 변조전류의 폭이 약 5%까지는 penalty가 0.1 dB 이하를 나타낸다. 변조주파수를 변화시켜서 변조폭에 대한 BER변화를 측정하였을 때, SBS 효과가 제거되는 변조폭이 증가하며 이 때문에 진폭변조로 인한 penalty도 증가함을 관측하였다. 따라서 위의 결과를 종합하면, bias 전류 변조에 의한 송신기 자체의 penalty를 0.1 dB로 제한하고 15 dBm의 입사광세기에서 SBS 현상을 충분히 제거하려면 본 실험에 사용된 LD

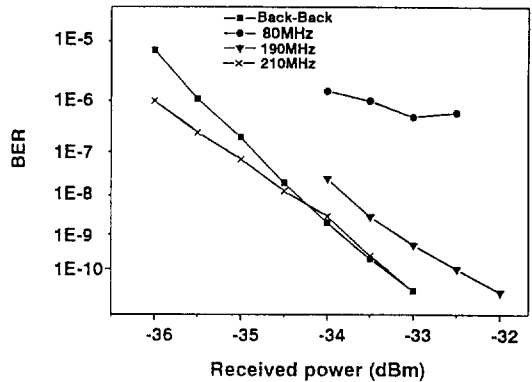


그림 8. 광원의 선폭에 대한 SBS 억제특성으로서 15 dBm의 광원이 DSF 100 km를 진행한 후의 수신감도

에서는 200 kHz의 변조주파수에 대해 2.5~5%로 변조폭이 적절하다는 결론을 내렸다.

LD에 따라서 bias 전류 변조에 의한 광출력 변조 및 발진 파장 변조의 효율이 다르다. 만약 LD를 직접 변조용 송신기로 이용하고자 할 경우에는 주어진 전류 변조에

대해 광출력 변조 효율이 높고 chirping 특성은 낮아야 한다. 그러나 본 실험에서와 같이 외부 변조방식의 송신기에서 SBS를 억제하고자 할 경우에는 반대로 광출력 변조 효율이 낮고 chirping 특성이 좋은 LD가 이상적이다. 일 예로 선폭이 3 MHz인 LD를 이용하였을 때 적정의 변조주파수는 100 kHz였고, 이 상태에서 SBS 억제 특성과 송신기 자체의 penalty를 측정된 결과가 그림 7이다. 8% 이상의 변조폭에서 SBS 현상이 제거되나, 송신기 자체의 penalty가 0.1 dB가 되는 변조폭은 약 5%이다. 따라서 이와같은 LD를 이용하여 15 dBm 이상의 광출력에서도 SBS 현상을 제거하려고 할 때, 송신기 자체의 penalty가 증가하게 된다.

그림 8은 변조된 신호광의 선폭에 따른 BER 특성변화이다. 광원의 선폭의 관점에서 보면 15 dBm의 입사 광세기에 대해 분산천이 단일모드 광섬유와 비분산 천이 단일모드 광섬유에서 광원의 선폭이 약 200 MHz이면 SBS 현상이 충분히 제거되었다. SBS 이득 대역폭 $\Delta\nu_B$ 가 약 30 MHz이므로 광원을 변조하지 않았을 때, 즉 광원의 선폭이 40 MHz일 경우에 비하여 변조에 의한 광원의 선폭이 200 MHz일 때의 SBS 임계 광세기가 약 5 dB 이상 증가한다는 것을 1식으로 부터 알 수 있다.

LD의 선폭 확대에 의해 SBS 현상이 제거되는 것은 광섬유를 진행한 후의 eye pattern으로도 관측할 수 있었다. 그림 4에서 처럼 SBS 현상에 의해 '1'의 광세기가 줄고 eye opening이 줄어드는 현상이, LD에 변조를 가하면 '1' 상태의 광세기가 증가하고 eye opening도 SBS 현상이 있기 전의 상태로 됨을 관측하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광전송시스템에서 송신광의 세기에 의해 유도되는 SBS 현상으로 인해 BER이 나빠지는 현상을 관측하였고 송신기용 LD의 선폭을 SBS의 이득대역폭보다 넓게 확대함으로써 SBS 현상을 제거한 결과를 기술하였다.

1550 nm에서 단일모드인 분산천이 광섬유에 15 dBm의 광원을 입사시키기 위해서는 광원의 선폭을 200 MHz 이상으로 확대시켜야 함을 알았다. 송신기용 LD의 선

폭을 확대시키기 위해 LD bias 전류에 변조를 가하였으며, 본 실험에 이용된 LD에서는 200 kHz의 주파수에서 약 2.5~5%로 변조할 경우, 진폭변조에 의한 penalty가 0.1 dB 이하였고, 발진선폭이 200 MHz가 되었다.

SBS 효과를 억제하기 위해 LD에 가하는 적정의 변조주파수 및 변조 진폭은 시스템에서 요구하는 입력 신호광세기와 송신기용 LD의 주파수 특성 및 광선로 특성에 따라 달라진다. 따라서 시스템의 요구사항 및 구성요소가 달라질 경우 각 소자의 특성을 측정하여 LD의 변조 주파수 및 진폭을 결정하여야 한다.

감사의 말

본 연구에 도움을 주신 박창수 실장님, 이만섭 부장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 2nd ed., Academic Press, NewYork, 1995, chap.9.
- [2] Y. K. Park, O. Mizuhara, L. D. Tzeng, J. M. P. Delavaux, T. V. Nguyen, U. L. Kao, P. D. Yeates and J. Stone, "A 5 Gb/s repeaterless transmission system using Erbium doped fiber amplifiers", *IEEE Photo. Tech. Lett.*, **5**(1), 79(1993).
- [3] D. Cotter, "Stimulated Brillouin scattering in monomode optical fiber", *J. Opt. Comm.*, **4**, 10(1983).
- [4] K. Petermann, *Laser diode modulation and noise*, Kluwer Academic Publishers, London, 1988, chap. 5.
- [5] X. Gu, A. B. Ellis, and D. M. Spirit, "Stimulated Brillouin scattering in installed standard fiber and its influence on a 10 Gb/s system binary and duobinary signalling", *Proc. of IOOC'95*, HongKong, Jun, 27, 1995.
- [6] Y. Aoki, K. Tajima, and I. Mito, "Input power limits of single mode optical fibers due to Stimulated Brillouin Scattering in optical communication systems", *J. Lightwave Tech.*, **6**(5), 710(1988)

Suppression of the Stimulated Brillouin Scattering Effect in Optical Transmission System*

Hyang Kyun Kim and Chang Hee Lee

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

Jung Hee Han

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

(Received: November 1, 1995)

Degradation of the optical communication system due to the stimulated Brillouin scattering effect in the optical fiber is measured, and its suppression is demonstrated. In the externally modulated 2.5 Gb/s transmission experiment, bit error rate is increased due to the stimulated Brillouin scattering effect when the signal power (linewidth 3 MHz) incident into the dispersion shifted fiber is larger than 10 dBm. SBS effect is suppressed completely, up to 15 dBm of transmission power, by broadening the source linewidth to 200 MHz.