

비선형 증폭 루프에서의 평균 솔리톤의 안정성

심숙이[†] · 이성서

공주대학교 응용물리학과 및 기초과학연구소

④ 314-701 충남 공주시 신관동 182번지

김광훈

한국전기연구소 전기물리연구팀

④ 641-120 경남 창원시 성주동 28-1

김기옥

우석대학교 반도체과학과

④ 565-701 전북 완주시 삼례읍 후정리 490

(2001년 7월 25일 받음, 2001년 10월 9일 수정본 받음)

간단한 비선형 증폭 루프에서의 평균 솔리톤 전송의 안정성을 비선형 Schroedinger 방정식에 기초한 수치해석법을 이용하여 솔리톤 주기에 대한 증폭 주기의 비율과 루프에서의 erbium doped 광섬유의 길이 비율을 변화시켜가며 계산하고 그 결과를 분석하였다. 계산 결과 루프에서의 erbium doped 광섬유의 길이 비율이 작을 경우 증폭 주기가 솔리톤 주기에 비해 많이 작아야 한다는 기존의 평균 솔리톤 형성 조건이 완화됨을 알 수 있었다.

분류코드 : OC.010, OS.010.

I. 서 론

전파하여 감에 따라 분산효과 때문에 진폭이 점점 줄어들어 결국은 소멸하여 버리는 일반적인 파와는 달리, 긴 거리를 진행하여도 안정되어 변형되지 않으며 일정한 속도와 모양을 유지하는 파를 솔리톤파라고 한다. 이러한 솔리톤파가 만들어질 수 있는 이유는 파의 분산효과를 비선형효과가 상쇄하여 균형을 이루기 때문이다.^[1-3] 1973년 벨 연구소의 하세가와(A. Hasegawa)에 의하여 광섬유 속에서 광솔리톤이 형성될 수 있음이 예측되었고, 1980년 몰레나워(L. F. Mollenauer)등은 실제로 광섬유 속에서 광솔리톤을 발견하였다.^[4] 그 후 광솔리톤 시스템은 대용량 정보처리 용량과 장거리 전송에서의 탁월한 안정성 등의 잇점 때문에 광통신 시스템의 궁극적인 해결책으로 주목받게 되었고 집중적으로 연구되어 왔다. 보통의 광파를 이용한 광통신 시스템은 장거리 전송시 펄스의 왜곡 때문에 정보전달 용량과 속도에 큰 제한이 따르는데 반해, 광솔리톤을 이용한 광통신은 장거리 대용량 전송에 있어서 그 안정성으로 인해 이상적인 수단이 될 것이다. 그러나, 솔리톤이라 할지라도 장거리 전송시에는 energy loss를 피할 수 없으므로 진폭이 줄어드는 것을 완전히 피할 수는 없다. 이것을 보상해 주기 위해 주기적인 증폭이 필요해지게 된다. 평균 솔리톤(average soliton) 혹은 guiding center 솔리톤의 개념은 주기적으로 증폭되는 시스템에서의 솔리톤 형성을 기술하기 위해

Hasegawa와 Kodama등이 도입^[5,6]하였다. 증폭 주기가 솔리톤 주기에 비해 충분히 작도록 광전송 시스템이 구성되면, 평균 분산이 평균 비선형 위상 변조와 균형을 이루어 평균 솔리톤이 형성된다는 것이다. 최근에는 비선형 증폭 루프 시스템(NALM: Nonlinear Amplifying Loop Mirror System)을 사용한 수동으로 모드락킹된 erbium doped fiber laser에서의 솔리톤 발생이 보고되었고,^[7,8] Kelly등이 평균 솔리톤 dynamics를 사용하여 high gain fiber laser에서의 솔리톤 전송을 설명^[9]하였다. 그러나, 그들은 루프 구성 성분으로 단지 active erbium doped part만을 고려하고 long passive fiber part는 고려하지 않았다.^[10] 본 논문에서는 광섬유 루프 안에서 active erbium doped part와 passive undoped part 모두를 포함하는 간단한 NALM을 고려하여 주기적 증폭을 해줄 경우에 형성되는 평균 솔리톤의 전파 안정성을 연구한 결과를 제시하고자 한다. 솔리톤 주기에 대한 증폭 주기의 비율과 전체 광섬유 루프 중 erbium-doped fiber의 길이 비율을 변화시키며 비선형 Schroedinger 방정식을 풀어 수치적으로 분석하였다.

II. 이 론

광통신에서 정보 전달을 위해 이용되는 펄스는 보통 여러 파장의 빛을 포함하고 있으며 광섬유 속에서의 광파의 속력은 파장에 따라서 달라지므로 펄스가 광섬유 속을 전파함에 따라 폭이 넓어지고 진폭이 작아지는 분산효과가 나타난다. 이러한 분산효과 때문에 입력 펄스는 수십 킬로미터를 진행함에 따라

[†]E-mail: shim@kongju.ac.kr

그 모양이 왜곡되고 펄스 폭이 넓어지게 된다. 예를 들어 파장 1.5 미크론의 광펄스를 약 10 피코초의 펄스 폭으로 입력 시켰을 경우 30킬로미터 진행했을 때 펄스 폭이 약 150피코초로 증가한다. 이러한 펄스 폭의 넓어짐은 펄스 사이의 중첩을 만들어 신호를 왜곡시켜 정확한 정보를 전달할 수 없게 만들므로 펄스간의 간격을 넓히지 않으면 안되며, 펄스 간격을 넓히면 전달할 수 있는 정보의 양은 그만큼 줄어들게 된다. 현재 사용되고 있는 광통신 방식에서는 약 40킬로미터마다 중계기를 설치하여 분산된 광펄스를 원래의 크기와 모양으로 증폭시킴으로써 장거리 전송을 가능하게 하고 있다. 광통신에 모양과 크기가 거의 변하지 않는 광솔리톤을 이용하면 약 6,000 킬로미터의 거리를 중계기없이 전송할 수 있고, 분산효과에 의한 펄스 폭의 넓어짐도 없으므로 펄스간격을 줄여서, 전달할 수 있는 정보의 양을 증가시킬 수 있다. 현재 보통의 광파를 사용한 전송의 경우 최대 전송용량이 약 1.6 기가비트이나, 광솔리톤을 사용하면 전송용량을 최대 100기가 바이트까지 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.^[1] 그러나, 솔리톤파라 할지라도 장거리 전송시에는 energy loss를 피할 수 없으므로 진폭이 조금씩 줄어들게 된다. 이것을 보상해 주기 위해 주기적인 증폭이 필요해지는데 이러한 경우에도 평균적으로 솔리톤의 형성이 가능함이 증명되었고 이 솔리톤을 평균 솔리톤이라 하는 것이다.^[5,6,11] 또한 8자형 루프를 이용하여 광파를 깊은 거리에서 주기적으로 증폭시킴으로써 평균 솔리톤을 발생시키는 것이 가능하다는 것이 최근에 발표되었다.^[7,10] 본 절에서는 일반적인 NALM에서의 평균 솔리톤을 설명하고자 한다. 광섬유에서의 광펄스의 진행은 다음과 같은 규격화된 비선형 Schroedinger 방정식에 의해 기술된다.

$$\frac{\partial E}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} + |E|^2 E = i\Gamma E - i\Gamma' E \quad (1)$$

여기서 E 는 규격화된 전기장의 진폭, Z 와 T 는 각각 진행거리와 진행시간에 비례하는 변수로서 참고문헌 [3, 5]에서 정의한 바와 같이 $Z = \varepsilon^2 z/\lambda$, $T = \varepsilon(t - z/v_g)/(-\lambda k')^{1/2}$ 로 주어지고 여기에서 ε 은 스케일 변수, v_g 와 k' 은 각각 파장이 λ 일 때의 군속도 및 그의 분산에 해당한다. Γ 는 비선형 fiber gain, Γ' 는 fiber loss를 나타내며 NALM 시스템에서 Γ' 은 Γ 에 비해 충분히 작으므로 무시한다. 3차 분산 효과나 라만 효과 등 gain을 제외한 다른 효과는 계산에 포함시키지 않으며 자기 위상 변조만 고려하고 상호 위상변조는 고려하지 않는다. Fiber gain도 없는 경우, 즉 $\Gamma = 0$ 일 때, 식 (1)의 솔리톤 해 중의 하나는 다음과 같이 주어진다는 것이 잘 알려져 있다.^[12]

$$E(Z, T) = 2\eta \operatorname{sech}(2\eta T) e^{-i4\eta^2 Z} \quad (2)$$

여기서 2η 는 솔리톤 진폭과 그것의 inverse width를 의미한다. 만약 power 변화가 주기적이면 식 (1)의 오른쪽 항은 $E = A(Z)U$ 로 놓음으로써 없앨 수 있고, 식 (1)을 다시 쓰면,

$$i\frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + A^2(Z)|U|^2 U = 0 \quad (3)$$

이 되며 여기에서 비선형 계수 $A^2(Z)$ 에 주기적 변화가 포함되

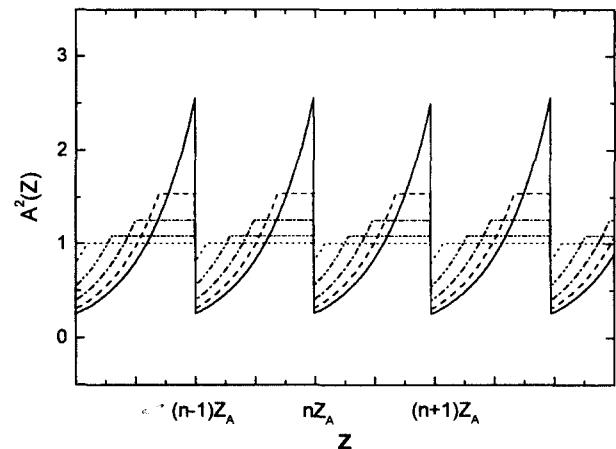


그림 1. $f = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0$ 일 때의 $A^2(Z)$ 의 변화. 즉 주기적 이득 profile. 맨 위의 실선이 $f = 1.0$ 일 때의 이득 곡선에 해당하며 아래쪽으로 차례로 f 가 0.7, 0.5, 0.3 0.1 일 경우들에 해당한다.

고, $A^2(Z)$ 의 평균치가 $\langle A^2(Z) \rangle = 1$ 의 조건을 만족할 때, 평균 솔리톤이 얻어진다. 만약 fiber 루프가 단지 active erbium doped fiber 로만 구성되어 있다면, gain profile은 참고문헌 [9]의 그림 1에서와 같이, 주기적인 지수함수 형태가 될 것이다. Z_A 의 증폭 주기를 갖는 constant gain Γ 를 고려하면 $A^2(Z) = ce^{2\Gamma Z_A}$ 되고 $\langle A^2(Z) \rangle = 1$ 을 만족해야 하므로

$$\frac{1}{Z_A} \int_0^{Z_A} A^2(Z) dZ = 1 \quad (4)$$

이 되고 따라서 $A^2(Z)$ 는 다음과 같다.

$$A^2(Z) = \frac{2\Gamma Z_A}{e^{2\Gamma Z_A} - 1} e^{2\Gamma Z} \quad (5)$$

그러나, 8자형 루프를 이용한 soliton laser에서 쓰이는 것과 같은 보통의 NALM을 고려하면 루프는 long passive undoped fiber part와 short active erbium doped fiber part로 구성된다. 본 논문에서는 passive part와 active part를 모두 갖는 하나의 NALM 루프를 고려하였다. 다시 말해서 gain 이 루프 전체에서 더 이상 일정하지 않고 NALM의 일부만 erbium doped fiber로서 gain을 얻을 수 있을 경우를 고려하였다. 비선형 루프 주위로 한 방향으로만 도는 모형을 고려하였고^[9] 시작점에서 erbium doped section을 지나며 증폭되어 높은 강도로 광섬유 루프를 지나게 되는 것을 고려하였으며 참고문헌 [9]에서와 같이 출력단, 즉 $Z = Z_A$ 에서 광 power의 일부인 T 가 빠져나가고 나머지 $1-T$ 가 재 주입되는 모형을 고려하였다. 한바퀴 도는 동안 얻어지는 이득, 즉 single pass gain G 는 빠져나간 손실 T 를 정확히 보상해준다고 가정한다. 또한 한바퀴 도는 동안의 순이득이 되는, 이득과 손실의 합은 변하지 않으며 주기적 에너지의 변이를 경험하게 된다(그림 1 참조). 이러한 주기적 에너지의 변이가 있을 경우 솔리톤의 전파 안정성을 조사하고자 하는 것이 본 연구의 목적인 것이다. 한 증폭 주기 동안 얻어지는 gain의 평균치가 $\langle A^2(Z) \rangle = 1$ 의 조건을 만

족하게 되면 평균 솔리톤 파를 이루게 되므로

$$\frac{1}{Z_A} \int_0^{fZ_A} ae^{2rZ} dZ + ae^{2rZ_A}(1-f) = 1 \quad (6)$$

이고 여기서,

$$a = \left[\frac{e^{2rZ_A} - 1}{2rZ_A} + e^{2rZ_A}(1-f) \right]^{-1} \quad (7)$$

이 되며, 따라서 식 (3)의 $A^2(Z)$ 는 이 경우 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} A^2(Z) &= ae^{2rZ} \quad 0 < Z \leq fZ_A \\ &= ae^{2rZ_A} \quad fZ_A < Z \leq Z_A \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 f 는 비선형 루프에서의 active erbium doped fiber section의 length fraction이며 따라서 f 는 0에서 1 사이의 값 을 가질 수 있다. 그림 1에서 $f=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0$ 일 때의 $A^2(Z)$ 의 변화, 즉 주기적 이득 profile을 보여주고 있다. 맨 위의 실선이 $f=1.0$ 일 때의 이득 곡선에 해당하며 아래쪽으로 차례로 $f=0.7, 0.5, 0.3, 0.1$ 일 경우들에 해당한다. $f=1$ 일 때는 참고문헌의 그림 1에서의 모양과 일치하게 되며 f 가 작 아지면, gain profile은 점점 더 distributed gain transmission system에서의 gain profile과 유사해진다.^[13,14]

III. 결과 및 분석

비선형 증폭 루프에서 주기적 증폭을 해줌으로써 형성되는 평균 솔리톤의 전파 안정성을 erbium doped fiber의 전체 길 이에서의 비율(f)과 솔리톤주기 Z_0 에 대한 증폭주기 Z_A 의 비 를 변화시키면서 비선형 Schroedinger 방정식을 풀어 수치적

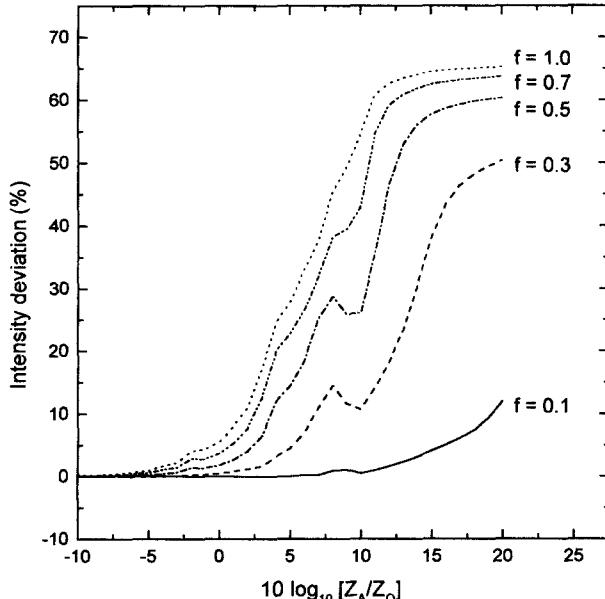


그림 2. 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 등의 f 의 값에서의 솔리톤주기에 대한 증폭주기의 비에 따른 솔리톤 진폭 세기의 변화.

으로 분석하였다. 식 (3)의 비선형 Schroedinger 방정식을 풀기 위해 FEBPM(Finite Element Beam Propagation Method) 을 사용하여 컴퓨터 프로그램을 만들어 수치적 해석을 하였고 광 파의 초기 형태는 hyperbolic secant 함수로 가정하였다. ΓZ_A 는 10dB의 고정된 값으로 놓고 $10\log(Z_A/Z_0)$ 를 -10에서 20까 지 변화시켰다. 그럼 f 의 값이 각각, 0.1 0.3, 0.5, 0.7, 1등 일 때의 솔리톤주기에 대한 증폭주기의 비의 변화에 따른 솔리톤 진폭의 변화에 대한 계산 결과를 보여준다. f 가 감소할 때, 솔리톤의 안정성이 증가하는 것이 관찰되는데, 이것은 distributed gain transmission system에서의 안정성에 대해 과거에 보고된 결과와 일치한다.^[13,14] 또한, $f=1$ 일 경우의 계산 결과는 참고문헌 [9]의 그림 3에서 주어진 결과와 매우 잘 일치하고 있다. 그림 3에서는 $f=0.3$ 이고 $10\log(Z_A/Z_0) = -2$ 일 때의 솔리톤 전송 결과를 Z 축 방향으로 $50xZ_A$ 까지 보여주고 있는데 (a)의 3차원 그래프에서 과정과 진폭이 매우 안정된 상태로 거의 변화가 없는 것을 관측할 수 있다. 이것은 단지 루프의 3/10만이 active erbium doped section이 되는 경우에 $Z_A/Z_0 = 0.6$ 근처에서도 안정한 솔리톤파를 얻을 수 있음을 의

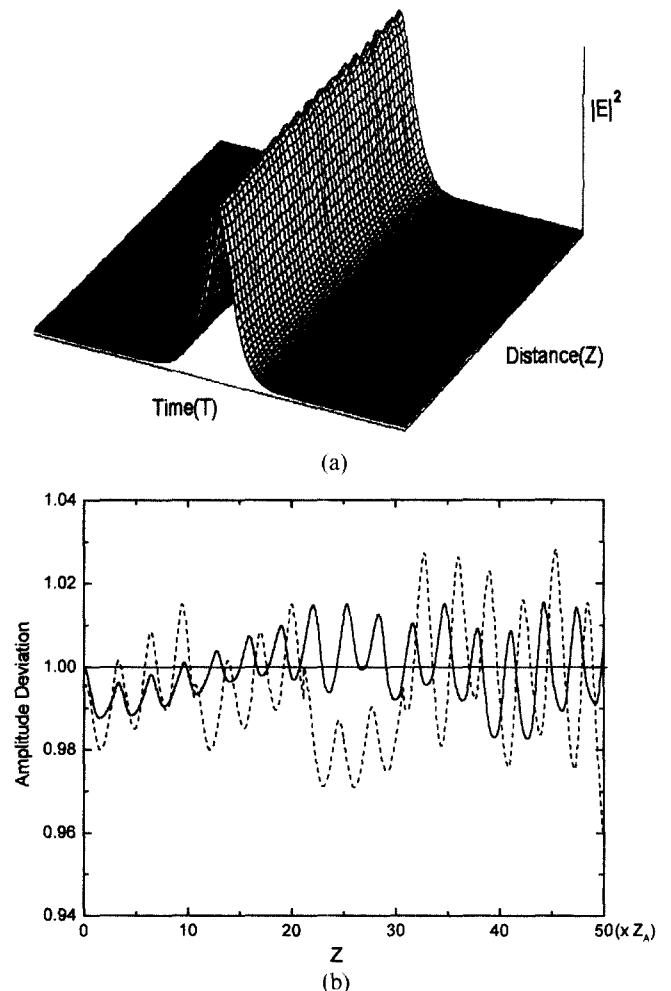


그림 3. $10\log(Z_A/Z_0) = -2$ 일 때 (a) $f=0.3$ 일 때의 솔리톤 전송의 3차원 그래프. (b) $f=0.3$ (실선), $f=0.5$ (파선)일 때의 솔리톤파 진폭의 변화.

미한다. 루프를 통해서 한바퀴를 돈 후 출력단에서의 E 를 고려하므로 $Z = nZ_A$ 에서 솔리톤 펄스가 관측된다는 것을 알 수 있다.^[14] 그림 3의 (b)에서의 실선은 이 경우 솔리톤파의 피크의 변이를 보이고 있는데 진폭의 변화가 2% 미만으로 나타났다. 이러한 결과는 기존의 평균 솔리톤 형성 조건으로 알려져 있던 Z_A/Z_0 가 아주 작아야 한다는 조건이 f 가 충분히 작을 경우에는 상당히 완화될 수 있다는 의미로 해석될 수 있다. 이러한 현상은 f 가 작아지는 것이 결과적으로 Z_A 의 감소 효과를 주기 때문에 나타나는 결과라고 분석된다. 안정성을 비교해보기 위하여 같은 조건에서 f 가 커서 충분히 작지 않은 경우, 즉 $f=0.5$ 일 때의 솔리톤 진폭의 변이를 계산하여 파선으로 나타내 보았는데 이 경우 진폭의 변화는 약간 커져서 4% 정도까지였으며 점차 변이가 커지고 있어 다소 불안정하게 나타났다.

IV. 결 론

에너지의 주기적 변이가 있는 경우의 솔리톤의 전파 안정성을 조사하기 위해 비선형 증폭 루프에서의 평균 솔리톤의 안정성을 erbium doped fiber의 전체길이에서의 비율 및 솔리톤 주기에 대한 증폭주기의 비율을 변화시켜 가며 조사하였다. erbium doped fiber의 전체길이에서의 비율이 작아질수록 솔리톤 전파는 안정적으로 나타났으며 예상하였던 바와 같이 증폭주기와 솔리톤 주기의 비도 작아질수록 안정적인 전파를 얻을 수 있었다.

결론적으로, simple nonlinear amplifying loop mirror에서의 솔리톤의 안정성에 대한 비선형 Schrödinger 방정식을 이용한 수치 해석의 결과로써 비선형 증폭 루프에서 erbium doped fiber 길이의 전체 루프 길이에서의 비율이 충분히 작다면 증폭 주기가 솔리톤 주기에 비해 근소하게 작을 때에도 평균 솔리톤의 안정된 전송이 얻어질 수 있다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 공주대학교 자체연구비의 후원을 받아 시행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] A. Hasegawa and Y. Kodama, *Solitons in Optical Communications* (Oxford University Press, 1995).
- [2] M. Remoissenet, *Waves Called Solitons* (Springer-Verlag, 1994).
- [3] A. Hasegawa, *Optical Solitons in Fibers* (Springer-Verlag, 1989).
- [4] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, and J. P. Gordon, "Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 45, pp. 1095-1097, 1980.
- [5] A. Hasegawa and Y. Kodama, "Guiding-center soliton in optical fibers," *Opt. Lett.*, vol. 15, no. 24, pp. 1443-1445, 1990.
- [6] A. Hasegawa and Y. Kodama, "Guiding center solitons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 66, pp. 161-164, 1991.
- [7] I. N. Duling, "All-fiber passively modelocked figure eight laser," *Proc. Opt. Soc. Am. Annual Meeting*, Boston, 1990, Paper PDP4.
- [8] D. J. Richardson, R. I. Laming, D. N. Payne, M. W. Phillips, and V. J. Matsas, "320 fs soliton generation with passively mode-locked erbium fibre laser," *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 730-732, 1991.
- [9] S. M. J. Kelly, L. Smith, K. J. Blow, and N. J. Doran, "Average soliton dynamics of a high-gain erbium fiber laser," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 17, pp. 1337-1339, 1991.
- [10] S. Shim *et al.*, "Soliton stability in a nonlinear amplifying loop mirror," *Proc. of the Optoelectronics and Communications Conference (OECC '97)*, Seoul, 1997, Paper 9EP-13.
- [11] K. J. Blow and N. J. Doran, "Average soliton dynamics and the operation of soliton systems with lumped amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 369-371, 1991.
- [12] J. N. Elgin and S. M. J. Kelly, "Spectral modulation and the growth of resonant modes associated with periodically amplified solitons," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 10, pp. 787-789, 1993.
- [13] K. Rottwitt, J. H. Povlsen, S. Gundersen, and A. Bjarklev, "Stability in distributed and lumped gain transmission systems," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 11, pp. 867-869, 1993.
- [14] F. Chiaraluce, E. Gambi, and P. Pierleoni, "Soliton propagation in long erbium-doped fiber amplifiers with nonuniform gain," *Opt. Commun.*, vol. 105, pp. 47-51, 1994.
- [15] I. N. Duling, "Subpicosecond all-fiber erbium laser," *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 544-545, 1991.

Stability of average soliton propagation in a nonlinear amplifying loop mirror

Sugie Shim[†] and Sung-Suh Rhee

*Physics Department and Research Institute of Natural Science,
Kongju National University, Kongjusi 314-701, KOREA*

[†]E-mail: shim@kongju.ac.kr

Kwang Hoon Kim

Electrical Physics Team, KERI, Changwonsi 641-120, KOREA

Gi-Ok Kim

Department of Physics, Woosuk University, Wanjusi 565-701, KOREA

(Received July 25, 2001 ; revised manuscript received October 9, 2001)

A numerical analysis based on the nonlinear Schroedinger equation is presented to analyze the propagation stability of the average soliton in a simple nonlinear amplifying loop mirror. The ratio of amplification period to soliton period and the length fraction of the erbium-doped fiber in the loop are varied to investigate their effects on the soliton stability. It is observed that stable soliton propagation is obtained even when the amplification period is only slightly shorter than the soliton period when the length fraction of the erbium-doped fiber in the loop is small, which is different from the previously published condition for stable average soliton propagation.

Classification codes : OC.010, OS.010.