

진폭과 위상에 따른 어두운 솔리톤의 진행특성에 대한 전산시뮬*

김광훈 · 윤선현 · 문희종 · 임용식 · 이재형 · 장준성

서울대학교 자연과학대학 물리학과

(1994년 5월 30일 받음)

광솔리톤의 진행을 기술하는 비선형 슈뢰딩거 방정식의 전산시뮬으로 진폭과 위상의 초기조건에 따른 어두운 솔리톤의 진행특성을 연구하였다. 진행거리가 증가함에 따라, 홀대칭 어두운 솔리톤은 하나의 검은 솔리톤과 어두운 정도의 부호가 서로 다른 잿빛 솔리톤의 쌍들로 분리되고 짝대칭 어두운 솔리톤은 검은 솔리톤 없이 잿빛 솔리톤의 쌍들로 분리된다. 검은 솔리톤과 잿빛 솔리톤이 인접하여 상호작용하는 경우 초기 진폭 형태는 같더라도 잿빛 솔리톤의 어두운 정도의 부호에 따라서 충돌 여부가 결정된다. 어두운 솔리톤에서는 어두운 정도에 따라 임의의 솔리톤을 형성할 수 있기 때문에 어두운 솔리톤의 에너지는 어두운 정도가 다른 어두운 솔리톤들로 분리됨을 진폭의 변화보다는 위상의 변화로부터 더 자세히 알 수 있었다.

I. 서 론

솔리톤(solitons)은 먼 거리를 진행하는 동안 형태나 에너지가 변하지 않으며 다른 것들과 충돌 후에도 형태나 에너지가 변하지 않는 입자같은(particle-like) 성질을 나타내는 파로서, Zabusky와 Kruskal에 의하여 붙여진 이름이다.^[1] 넓은 의미로 솔리톤은 진행하는 동안에 모양이 거의 변화가 없거나 일정한 관계를 가지며 변화하는 고립파(solitary wave)를 포함하는데 이에 대한 현상적인 연구는 이미 19세기에 운하를 따라 진행하는 천수파(shallow water waves)의 연구로부터 시작되었다.^[2] 1960년대에 해석적으로 역산란방법(inverse scattering method)이 개발되면서^[3] 이론적인 연구에 큰 진전이 있었고 컴퓨터의 발달로 전산시뮬을 통하여 많은 특성들이 연구되었다. 솔리톤은 입자 물리, 플라즈마 물리, 고체물리, 비선형 광학 등 다양한 분야에서 연구되고 있다.

광솔리톤(optical solitons)이라 불리는 비선형 광학에서의 솔리톤은 자기위상변조, 다중파혼합, 유도산란 등의 비선형 현상에 기인하는 것으로 진폭포락선(amplitude envelope)이 솔리톤의 특성을 나타낸다.^[4] 여기서는 우리의 관심을 자기위상변조와 관련된 현상에 국한시키고

자 한다. 광솔리톤은 자기위상변조에 대한 상호 상쇄현상으로 분산이 관여하는 시간 솔리톤(temporal solitons)과 회절이 관여하는 공간 솔리톤(spatial solitons)로 구분되지만 수학적으로는 같은 규격화된 비선형 슈뢰딩거 방정식(nonlinear Schrödinger equation: NLSE)으로 표현된다.^[4] 1973년 이론적으로 광섬유를 통하여 솔리톤 전송의 가능성이 예견되었으나^[5] 에너지 손실이 적은 광섬유의 개발이 늦어져 1980년이 되어서야 다중모드 광섬유에서 처음으로 광솔리톤이 관측되었다.^[6] 그 이후 광솔리톤은 짧은 펄스를 이용한 대용량의 광통신에 응용될 가능성으로 많은 사람들의 관심을 끌고 있다.^[7] 근래에 들어서는 광 스위칭, 광 프로세싱 등의 응용 가능성으로 공간 솔리톤에 대한 연구도 많이 되고 있다.^[8,9]

비선형 슈뢰딩거 방정식은 경계조건에 따라 밝은 솔리톤(bright solitons)과 어두운 솔리톤(dark solitons)의 해를 갖는다. 밝은 솔리톤은 펄스 형태를 갖는 것이고 어두운 솔리톤은 일정한 크기의 뒷배경에 국소적으로 움푹 들어간 형태를 갖는다. 어두운 솔리톤은 에너지 손실, 뒷배경 잡음, 솔리톤 간의 상호작용 등에서 밝은 솔리톤보다 더 안정하여 근래에 많이 연구되고 있다.^[5,9] 역산란방법으로는 몇몇 특별한 초기조건에 대해서만 어두운 솔리톤의 해석적인 정확한 해가 구해져 있고^[10,12] 대부분의 경우 전산시뮬을 통하여 솔리톤의 진행특성이 연구되고 있다.^[7] 본 논문에서는 비선형 슈뢰딩거 방정

* 본 연구는 한국원자력연구소 원자력 중장기 위탁 연구비와 1994년도 교육부 기초과학육성연구비의 지원으로 이루어졌음.

식의 전산시뮬으로 진폭과 위상의 초기조건에 따른 어두운 솔리톤의 진행특성을 연구하였다. 광솔리톤은 포락솔리톤(envelope solitons)으로 진행거리에 따른 진폭의 변화가 솔리톤의 특성을 나타내지만 어두운 솔리톤의 경우 위상 형태가 중요하므로 위상의 변화도 살펴보았다.

II. 어두운 솔리톤

자기위상변조(self-phase modulation)는 광 커효과(optical Kerr effect)라는 3차 비선형 현상으로 빛의 세기에 따른 굴절률의 변화($n(I)=n_0+n_2I$) 때문에 생기는 위상 변조 현상이다.^[12] n_0 는 일반적으로 매질의 굴절율로 불리우는 선형굴절율이고 n_2I 는 빛의 세기에 따른 굴절율의 변화이다. 빛은 비선형 굴절율(n_2)의 부호에 따라 렌즈 효과로 자기집속(self-focusing: $n_2>0$)이 될 수도, 자기확산(self-defocusing: $n_2<0$)이 될 수도 있다.

광 솔리톤은 수학적으로 다음과 같은 규격화된 비선형 위퇴덩거 방정식으로 표현된다.^[7,10]

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \beta |A|^2 A \quad (1)$$

여기서 $A(z, x)$ 는 복소진폭(complex amplitude)이고, z 는 빛의 진행 방향이다. x 는 고립파의 방향을 나타내는 데, 시간 솔리톤의 경우 군속도 v_g 로 진행하는 펄스의 중심을 원점으로 하여 펄스 각부분에서의 시간지연 ($x=\tau-t-z/v_g$)을 나타내고 공간 솔리톤의 경우 빛의 진행방향에 수직인 횡방향 공간 모드에서 중심으로부터의 거리를 나타낸다. 즉, 시간 솔리톤은 우리가 관심이 있는 고립파가 빛의 진행방향과 같은 방향에 있는 경우이고 공간 솔리톤은 수직인 방향에 있는 경우이다. β 는 비선형 굴절율과 이에 대응하는 분산 또는 회절의 부호에 의하여 결정되는 값으로 시간 솔리톤의 경우 $-n_2/D$ (여기서 D 는 분산계수의 부호를, 공간 솔리톤의 경우 회절의 방향은 결정적이므로 n_2 의 부호를 나타낸다. 식 (1)의 우변에서 첫째 항은 분산이나 회절을 나타내고 둘째 항은 비선형 현상인 자기위상변조를 나타낸다. 우변 항들이 서로 완전히 상쇄되면 진행거리에 무관하게 형태의 변화가 없는 엄격한 의미의 솔리톤이 된다.

식 (1)은 수학적으로 다음과 같은 해를 가지며 각각 밝은 솔리톤(bright solitons), 어두운 솔리톤(dark solitons)이라 한다.^[13]

$$A_b(z, x) = a \operatorname{sech}(ax) \exp(-ia^2z/2), \quad \beta=1 \quad (2)$$

$$A_d(z, x) = a \tanh(ax) \exp(ia^2z), \quad \beta=-1 \quad (3)$$

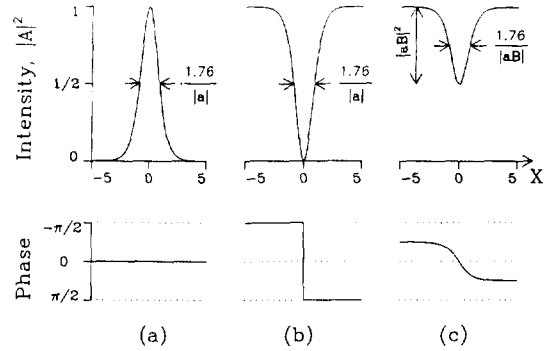


그림 1. 솔리톤의 진폭과 위상 형태. (a) 밝은 솔리톤, $a=1$, (b) 검은 솔리톤, $a=1, B=1$, (c) 잿빛 솔리톤, $a=1, B=1/\sqrt{2}$

여기서 a 는 솔리톤의 진폭과 넓이를 결정하는 형태인자(form factor)이고, 아랫첨자 b 와 d 는 각각 bright와 dark를 뜻한다. 밝은 솔리톤은 $|x|$ 가 증가함에 따라 진폭이 감소하는 펄스 모양(그림 1-(a))이지만, 이와 달리 어두운 솔리톤의 경우 무한대의 일정한 뒷배경에 국소적으로 움푹 들어간 형태(그림 1-(b))를 갖는다.

밝은 솔리톤은 진폭에 대하여 하나의 해만 갖지만 어두운 솔리톤은 뒷배경에 대하여 어두운 정도에 따라 연속적인 해를 가진다. 일반적으로 어두운 솔리톤에서 어두운 정도(blackness: B), 즉 움푹 들어간 정도를 고려하면 식 (1)은 다음과 같은 해를 갖는다.^[14]

$$A_d(z, \zeta) = a[1-B^2 \operatorname{sech}^2(|aB|\zeta)]^{1/2} \exp[i\phi(|aB|\zeta) + ia^2z] \quad (4)$$

여기서

$$\zeta = x - vz$$

$$v = \operatorname{sign}(B) |a| \sqrt{1-B^2}$$

$$\phi(\eta) = \sin^{-1} \left[\frac{-B \tanh(\eta)}{\sqrt{1-B^2 \operatorname{sech}^2(\eta)}} \right], \quad |B| \leq 1$$

이다.

$|B|=1$ 인 경우, 식 (4)는 식 (3)이 되는데, 이를 검은 솔리톤(black solitons)이라 한다. 검은 솔리톤은 중심에서 빛의 세기는 영이고 π 만큼의 갑작스런 위상변화를 갖는다. $|B|<1$ 인 경우를 잿빛 솔리톤(gray solitons)이라 하고, 그림 1-(c)와 같이 그 크기가 작아질수록 진폭이 작아지고 넓이가 증가한다. 잿빛 솔리톤의 경우 어두운 정도의 크기가 작을수록 위상변화가 천천히 일어나며 전체 위상 차이는 $2 \sin^{-1}(|B|)$ 이다. v 는 어두운 솔리톤의

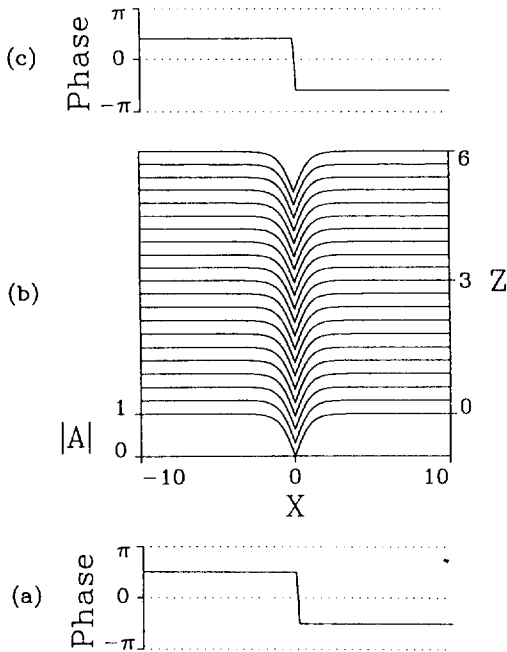


그림 2. 초기조건이 $u(0, x) = \tanh(x)$ 인 홀대칭 어두운 솔리톤의 진행거리에 따른 진행특성. (a) $z=0$ 일 때의 위상 형태, (b) $z=0$ 에서 $z=6$ 까지 진행거리에 따른 진폭의 변화, (c) $z=6$ 일 때의 위상 형태.

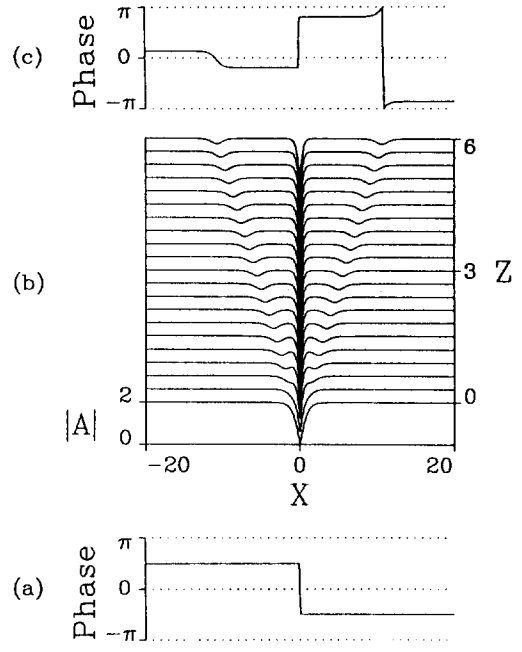


그림 3. 초기조건이 $A(0, x) = 2 \tanh(x)$ 인 홀대칭 어두운 솔리톤의 진행거리에 따른 진행특성. (a) $z=0$ 일 때의 위상 형태, (b) $z=0$ 에서 $z=6$ 까지 진행거리에 따른 진폭의 변화, (c) $z=6$ 일 때의 위상 형태.

수직방향 속도(transverse velocity, dx/dz)로 뒷배경의 크기가 클수록 그리고 어두운 정도의 크기가 작아질수록 속도가 증가하고 그 부호가 다르면 방향이 반대가 된다. 규격화된 어두운 솔리톤의 세기는 $I_p = |aB|^2$ 이고 반축넓이(FWHM)는 $w = 1.76/|aB|$ 이므로 $I_p w^2 = 1.76^2$ 으로 일정한 상수가 된다.^[14] 그림 1에서 보는 것과 같이 밝은 솔리톤은 전체적으로 일정한 위상을 갖지만 어두운 솔리톤은 어두운 정도에 따라 솔리톤의 중심 부근에서 위상변화가 있다.

초기조건에 대한 어두운 솔리톤의 진행특성을 조사하기 위한 비선형 슈뢰딩거 방정식의 전산시뮬레이션으로 explicit scheme에 근거한 finite difference 근사를 이용하여 staggered leapfrog 방법을 이용하였다.^[15] 다음 장에서는 초기의 위상 형태가 홀대칭(odd symmetry)과 짝대칭(even symmetry)인 경우에 대하여 어두운 솔리톤의 진행특성으로 진폭과 위상의 변화를 전산시뮬레이션하였다. 그리고 초기조건으로 진폭 형태는 같지만 어두운 정도의 부호가 다른 검은 솔리톤과 잿빛 솔리톤이 인접한 경우 상호작용에 의한 진행특성을 조사하였다.

III. 홀대칭 어두운 솔리톤

중심에서 위상이 π 만큼 갑작스런 변화가 있으면서 넓이가 일정하고 진폭이 다른 다음과 같은 초기조건을 갖는 홀대칭 어두운 솔리톤(odd dark solitons)의 진행특성을 살펴보자.

$$A_{odd}(0, x) = a \tanh(x) \tag{5}$$

$a=1$ 인 경우 식 (3)에서 어두운 솔리톤의 기본솔리톤(fundamental solitons)에 해당하는 것으로 전산시뮬레이션 결과는 그림 2와 같다. 그림 (a)는 초기 $z=0$ 에서의 위상 형태를 나타내고, 그림 (b)는 $z=0$ 에서 $z=6$ 까지 진행거리에 따른 진폭의 변화를 나타내고, 그리고 그림 (c)는 $z=6$ 일 때의 위상 형태를 나타낸 것이다.(이하의 그림에서도 동일함.) 밝은 솔리톤에서 a 가 정수인 고차솔리톤(higher-order solitons)은 π 의 주기로 진폭의 형태가 반복되는데^[7] 이와 비교하기 위하여 진행거리를 6까지 고려하였다. 기본솔리톤에서는 자기위상변조가 분산 또는 회절과 서로 완전히 상쇄가 되어 파가 진행하는 동안에

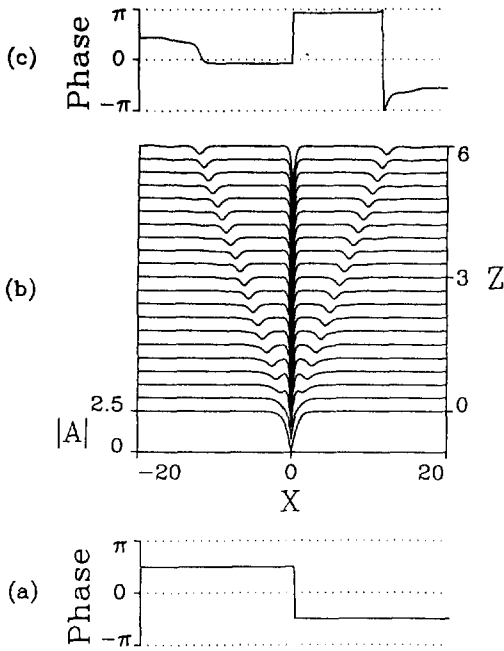


그림 4. 초기조건이 $A(0, x) = 2.5 \tanh(x)$ 인 홀대칭 어두운 솔리톤의 진행거리에 따른 진행특성. (a) $z=0$ 일 때의 위상 형태, (b) $z=0$ 에서 $z=6$ 까지 진행거리에 따른 진폭의 변화, (c) $z=6$ 일 때의 위상 형태.

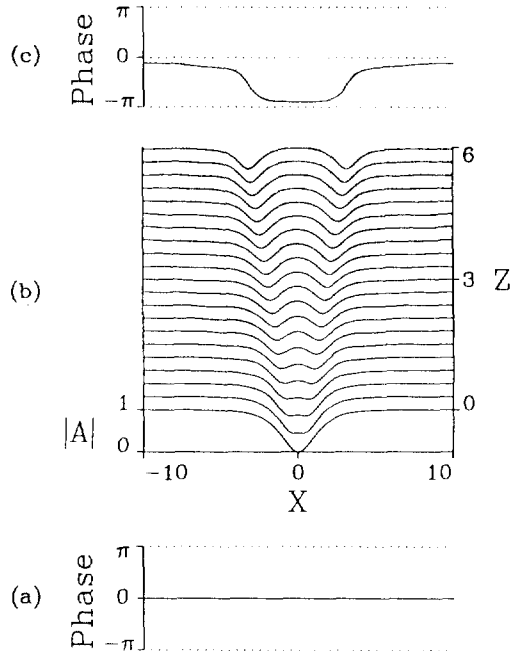


그림 5. 초기조건이 $A(0, x) = (1 - \text{sech}(x))$ 인 짝대칭 어두운 솔리톤의 진행거리에 따른 진행특성. (a) $z=0$ 일 때의 위상 형태, (b) $z=0$ 에서 $z=6$ 까지 진행거리에 따른 진폭의 변화, (c) $z=6$ 일 때의 위상 형태.

진폭 형태의 변화가 없음을 보여준다. 진행거리에 무관하게 어두운 솔리톤의 중심에서 π 만큼의 갑작스런 위상변화가 있으면서 식 (3)의 지수부분과 같이 진행거리에 비례하는 전체적으로 동일한 만큼의 위상 이동만 있다.

그림 3은 $a=2$ 인 경우, 즉 뒷배경의 세기가 기본 솔리톤의 4배인 고차솔리톤의 진행특성을 나타낸 것이다. 중심의 검은 솔리톤과 진행거리가 증가함에 따라 대칭적으로 멀어지는 한 쌍의 잿빛 솔리톤이 나타난다. 중심의 검은 솔리톤의 넓이는 진행 초기($z \leq 1$)에 줄어든 이후 그 크기가 유지된다. 이러한 결과는 식 (5) 형태의 초기조건이 진행거리가 증가함에 따라 넓이가 a 배 만큼 줄어든 식 (3) 형태의 기본솔리톤이 되기 때문이다. 그리고 여분의 에너지는 어두운 정도의 크기는 같지만 부호가 서로 반대인 상보적인 한 쌍의 잿빛 솔리톤의 형태로 분리된 것이다.

밝은 솔리톤에서 진폭의 크기가 정수인 고차 솔리톤은 모든 에너지가 솔리톤 형성에 기여하고 진폭의 형태가 주기적으로 반복되지만 진폭의 크기가 정수가 아닌 경우에는 솔리톤 형성에 기여하지 못한 에너지는 빠져나간다.^[7] 어두운 솔리톤에서 진폭이 정수가 아닌 $a=2.5$ 인

경우 전산시뮬한 결과는 그림 4와 같다. 진행거리에 따른 진폭의 변화는 $a=2$ 인 경우와 비슷하게 하나의 검은 솔리톤과 한 쌍의 잿빛 솔리톤의 형태를 갖는 것 같지만 위상변화에서는 다른 형태를 보인다. 그림 4(c)를 보면 중심에서 π 만큼의 갑작스런 위상변화가 있는 검은 솔리톤과 어두운 정도가 큰 한 쌍의 잿빛 솔리톤과 어두운 정도가 매우 작은 또 다른 한 쌍의 잿빛 솔리톤이 있음을 알 수 있다. 어두운 정도가 매우 작은 잿빛 솔리톤은 그림 4(b)에서와 같이 진행거리가 작은 경우에는 거의 구분되지 않다가 진행거리가 큰 경우 구분된다. 어두운 솔리톤에서는 어두운 정도에 따라 임의의 솔리톤을 형성할 수 있기 때문에 진행거리가 어느 정도 이상 증가하면 잿빛 솔리톤으로 분리됨을 진폭 변화보다는 위상 변화로부터 더 자세히 알 수 있다.

IV. 짝대칭 어두운 솔리톤

홀대칭 어두운 솔리톤과 달리 위상이 전체적으로 일정한 다음 식과 같은 형태를 갖는 초기조건에 대하여. 짝대칭 어두운 솔리톤(even dark solitons)의 진행특성을

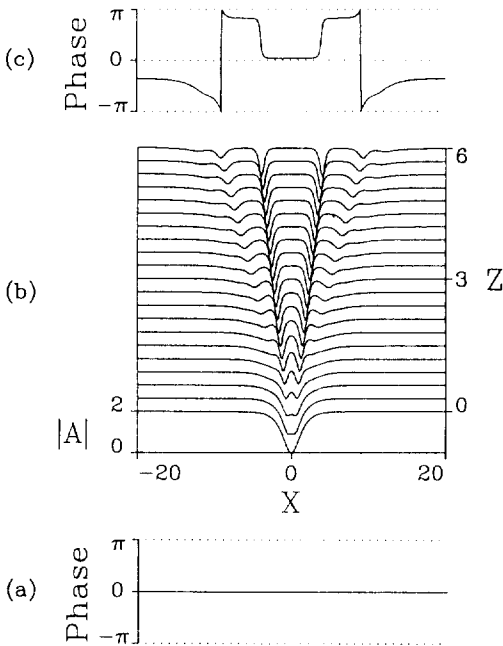


그림 6. 초기조건이 $A(0, x)=2(1-\text{sech}(x))$ 인 짝대칭 어두운 솔리톤의 진행거리에 따른 진행특성. (a) $z=0$ 일 때의 위상 형태, (b) $z=0$ 에서 $z=6$ 까지 진행거리에 따른 진폭의 변화, (c) $z=6$ 일 때의 위상 형태.

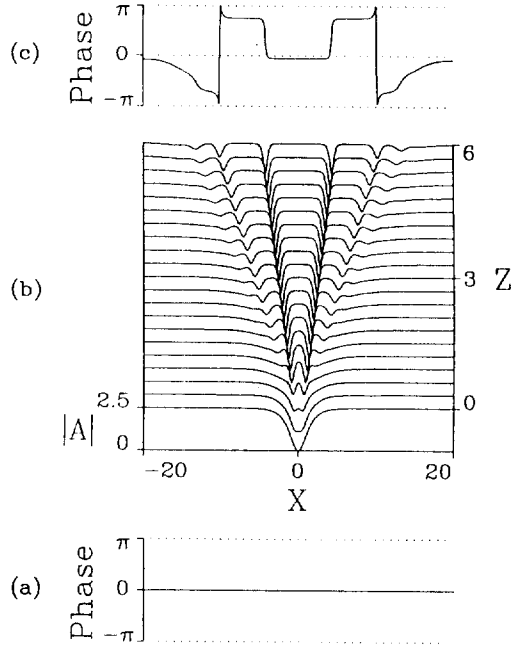


그림 7. 초기조건이 $A(0, x)=2.5(1-\text{sech}(x))$ 인 짝대칭 어두운 솔리톤의 진행거리에 따른 진행특성. (a) $z=0$ 일 때의 위상 형태, (b) $z=0$ 에서 $z=6$ 까지 진행거리에 따른 진폭의 변화, (c) $z=6$ 일 때의 위상 형태.

살펴보자.

$$A_{even}(0, x) = a(1 - \text{sech}(x)) \quad (6)$$

그림 5는 $a=1$ 인 짝대칭 어두운 솔리톤의 진행을 나타낸 것이다. 갑작스런 위상 변화가 없이 일정한 위상을 갖는 경우 검은 솔리톤은 형성되지 않고 어두운 정도가 큰 한 쌍의 잿빛 솔리톤이 형성된다. 그림 5-(c)의 가장 자리에 있는 위상의 형태로 보아 진행 거리가 더 증가하면 여분의 에너지는 어두운 정도가 작은 잿빛 솔리톤으로 분리될 것이다. 어두운 솔리톤들이 서로 멀어지는 것은 식 (1)의 비선형 슈뢰딩거 방정식에서 보는 것과 같이 우변의 둘째 항은 위치함수에 해당되는 것으로 $\beta < 0$ 이면 위치함수의 부호가 양이 되어 척력으로 작용하고 $\beta > 0$ 이면 위치함수의 부호가 음이 되어 인력으로 작용하기 때문이다. 따라서 어두운 솔리톤의 경우 높은 차수의 밝은 솔리톤에서 나타나는 묶인 상태(bound states)는^[7] 나타나지 않는다.

홀대칭 어두운 솔리톤에서와 같이 진폭이 각각 $a=2$, $a=2.5$ 인 짝대칭 어두운 솔리톤의 진행을 전산시뮬한 결과는 그림 6, 7과 같다. $a=1$ 인 경우와 같이 검은 솔

리톤은 형성되지 않고 어두운 정도가 다른 잿빛 솔리톤의 쌍들이 형성되어 서로 멀어진다. 진행거리에 따른 진폭의 변화를 보면 a 가 클수록, 즉 어두운 솔리톤의 에너지가 클수록 가장 자리에 있는 어두운 정도가 작은 부분에서의 잿빛 솔리톤들이 분명히 분리된다. 중심의 어두운 정도가 가장 큰 잿빛 솔리톤은 그림 6, 7(c)에서 보듯이 어두운 정도가 비슷하지만 뒷배경의 크기가 큰 경우에 더 큰 척력이 작용하여 더 많이 멀어진다. 그리고 위상변화를 보면 a 가 클수록 가장자리 부분에서 더 많은 수의 잿빛 솔리톤이 생성됨을 알 수 있다. 이들 결과로 보아 짝대칭 어두운 솔리톤에서는 홀대칭 어두운 솔리톤과 달리 진행거리가 증가함에 따라 어두운 정도의 크기가 1인 검은 솔리톤은 생성되지 않고 잿빛 솔리톤들만 생성됨을 알 수 있다.

V. 검은 솔리톤과 잿빛 솔리톤의 상호작용

어두운 정도의 크기가 $1/\sqrt{2}$ 인 잿빛 솔리톤과 어두운 정도의 크기가 1인 검은 솔리톤이 같이 있을 때 서로 간의 상호작용에 의한 진행 특성을 알아보기 위하여

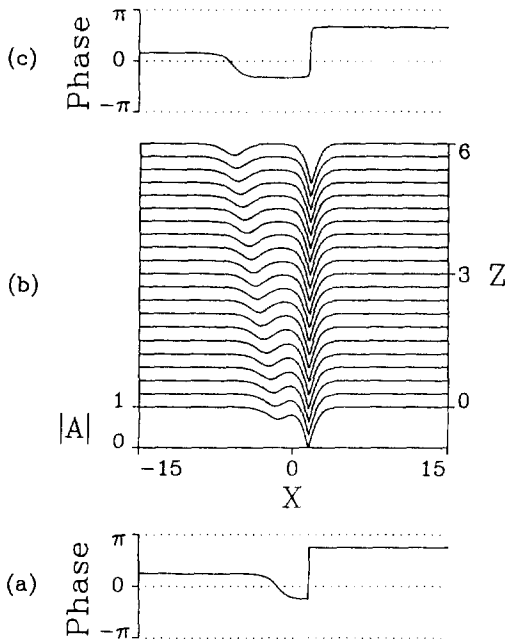


그림 8. 초기조건으로 어두운 정도가 $B=1/\sqrt{2}$ 인 잿빛 솔리톤과 $B=1$ 인 검은 솔리톤이 인접한 경우 진행거리에 따른 진행특성. (a) $z=0$ 일 때의 위상 형태, (b) $z=0$ 에서 $z=6$ 까지 진행거리에 따른 진폭의 변화, (c) $z=6$ 일 때의 위상 형태.

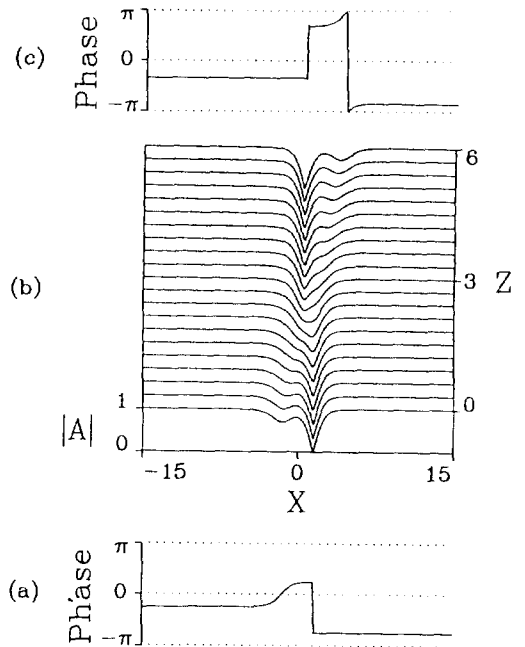


그림 9. 초기조건으로 어두운 정도가 $B=-1/\sqrt{2}$ 인 잿빛 솔리톤과 $B=1$ 인 검은 솔리톤이 인접한 경우 진행거리에 따른 진행특성. (a) $z=0$ 일 때의 위상 형태, (b) $z=0$ 에서 $z=6$ 까지 진행거리에 따른 진폭의 변화, (c) $z=6$ 일 때의 위상 형태.

전산시뮬하였다. 그림 8은 어두운 정도가 $1/\sqrt{2}$ 인 잿빛 솔리톤과 어두운 정도가 -1 인 검은 솔리톤이 인접한 경우이고, 그림 9는 어두운 정도가 $-1/\sqrt{2}$ 인 잿빛 솔리톤과 어두운 정도가 1 인 검은 솔리톤이 인접한 경우이다. 여기서 검은 솔리톤과 잿빛 솔리톤 중심 사이의 간격은 3이다. 초기의 진폭 형태는 서로 같지만 초기의 위상 형태는 부호가 서로 반대인, 즉 어두운 정도의 부호가 반대인 경우로 진행거리에 따라 다른 결과를 보여준다. 이는 밝은 솔리톤과 구별되는 어두운 솔리톤의 특징으로 초기 위상 형태가 어두운 솔리톤의 진행에 있어 매우 중요함을 보여준다. 앞에서 언급한 바와 같이 잿빛 솔리톤은 어두운 정도에 따른 수직방향의 속도를 갖고 있을 뿐 아니라 어두운 정도가 같더라도 부호가 다르면 그 방향이 반대가 된다. 따라서 진행 방향의 변화없이 진행하려는 검은 솔리톤과 어두운 정도의 부호에 따라 서로 반대 방향으로 진행하려는 잿빛 솔리톤의 상호작용에 의하여 그림 8의 경우는 서로 충돌하지 않고 멀어지지만 하지만 그림 9의 경우는 한 번 충돌한 후 서로 멀어진다. 서로 충돌하지 않는 경우에 검은 솔리톤은 그림 2에서와 같이 진행거리에 따라 형태나 방향의 변

화가 거의 없다. 그러나 잿빛 솔리톤과 충돌하는 경우에는 서로 진행 위치가 약간 이동된 후에 형태나 방향의 변화없이 진행한다.

VI. 결 론

자기위상변조가 분산 또는 회절과 상호작용하여 나타나는 광솔리톤에서 진폭과 위상의 초기조건에 따른 진행특성을 알아보기 위하여 규격화된 비선형 슈뢰딩거 방정식을 전산시뮬하였다. 비선형 슈뢰딩거 방정식은 경계조건에 따라 밝은 솔리톤과 어두운 솔리톤의 해를 갖는다. 어두운 솔리톤은 어두운 정도에 따라 검은 솔리톤과 잿빛 솔리톤으로 구분되고 특정한 위상 형태를 갖는다. 어두운 솔리톤은 뒷배경의 크기가 클수록 그리고 어두운 정도가 작을수록 수직방향의 속도가 크고 그 부호가 다르면 진행방향이 반대가 된다. 어두운 솔리톤의 진행특성을 알아보기 위하여 진폭 변화뿐만 아니라 위상 변화도 살펴보았다. 진행거리가 증가함에 따라 홀대칭 어두운 솔리톤은 하나의 검은 솔리톤과 어두운 정도의 부호가 서로 다른 잿빛 솔리톤의 쌍들로, 즉 홀수개의

어두운 솔리톤으로 분리되어 서로 멀어진다. 이와 달리 짝대칭 어두운 솔리톤은 검은 솔리톤 없이 잿빛 솔리톤의 쌍들로, 즉 짝수개의 어두운 솔리톤으로 분리되어 서로 멀어진다. 어두운 정도가 작은 잿빛 솔리톤은 진행거리가 작은 경우 잘 구분되지 않지만 진행거리가 큰 경우 다른 잿빛 솔리톤과 분리됨을 위상 형태로부터 알았다. 검은 솔리톤과 잿빛 솔리톤이 인접하여 서로 상호작용하는 경우 초기 진폭 형태는 같더라도 잿빛 솔리톤의 어두운 정도의 부호에 따라서 충돌 여부가 결정된다. 이로써 밝은 솔리톤과는 달리 어두운 솔리톤에서는 초기 위상 형태가 매우 중요함을 알았다.

참 고 문 헌

[1] N. Zabusky and M. D. Kruskal, Phys. Rev. Lett. **15**, 240(1965).
 [2] J. Scott Russel, in *British Association Reports* (John Murray, London, 1844).
 [3] C. S. Gardner, J. M. Greene, M. D. Kruskal, and R. M. Miura, Phys. Rev. Lett. **19**, 1095 (1967); S. Novikov, S. V. Manakov, L. P. Pitaevskii, V. E. Zakarov, *Theory of Solitons-The Inverse Scattering Method* (Plenum, New York, 1984).
 [4] G. P. Agrawal, "Optical Solitons," in *Contemporary Nonlinear Optics*, G. P. Agrawal and R. W. Boyd, ed. (Academic Press, San Diego, Calif., 1992).
 [5] A. Hasegawa and F. Tappert, Appl. Phys. Lett. **23**, 142(1973); *ibid.* **23**, 171(1973).
 [6] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, and M. N. Islam, Phys. Rev. Lett. **45**, 1095(1980).
 [7] J. R. Taylor, ed., *Optical Solitons-Theory and Experiment* (Cambridge University Press, Cambridge, 1992).
 [8] J. S. Aitchison, Y. Silberberg, A. M. Weiner, D. E. Leaird, M. K. Oliver, J. L. Jackel, E. M. Vogel, and P. W. E. Smith, J. Opt. Soc. Am. **B8**, 1290 (1991).
 [9] Y. S. Kivshar, IEEE J. Quantum Electron. **29**, 250 (1993).
 [10] V. E. Zakharov and A. Shabat, Sov. Phys. JETP **34**, 62(1972); *ibid.* **37**, 823(1973).
 [11] K. J. Blow and N. J. Doran, Phys. Lett. **A107**, 55(1985). N, Akhmediev and A. Ankiewicz, Phys. Rev. **A47**, 3213(1993).
 [12] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics* (Academic Press, San Diego, Calif., 1992).
 [13] W. Zhao and E. Bourkoff, Opt. Lett. **14**, 1371 (1989).
 [14] S. R. Skinner, G. R. Allan, D. R. Anderson, and A. L. Smirl, IEEE J. Quantum Electron. **27**, 2211 (1991).
 [15] W. H. Press, B. P. Flanery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in C* (Cambridge University Press, Cambridge, 1988).

Numerical Simulations on the Amplitude and Phase Dependent Propagation Characteristics of Dark Solitons

Guang-Hoon Kim, Sun-Hyun Youn, Hee-Jong Moon, Yongsik Lim,
 Jai-Hyung Lee and Joon-Sung Chang
 Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received: May 30, 1994)

We numerically studied on the dark solitons propagation for initial amplitude and phase shapes in the normalized nonlinear Schrödinger equation(NLSE) which describes the propagations of optical solitons. As the propagation distance increases, odd dark solitons evolve into a black soliton and pairs of gray solitons which have a different sign of blackness, and even dark solitons evolve into pairs of gray solitons without black solitons. When there exists a black soliton and a gray soliton, even though the initial amplitude shape is same, the sign of blackness of a gray solitons determines whether they would collide or not. We could see that the energy of dark solitons evolve into a couple of solitons of different blackness since there exists a continuous range of dark solitons with arbitrary blackness parameter, and this phenomenon was more clearly seen from the change of phase shapes from that of amplitude shapes.