

## 유한한 폭을 갖는 배경에서 기본 어두운 공간솔리톤의 진행특성\*

김광훈 · 문희종 · 임용식 · 이재형 · 장준성

서울대학교 자연과학대학 물리학과

(1995년 5월 9일 받음)

유한한 폭을 갖는 배경에서 기본 어두운 공간솔리톤의 진행특성을 실험적으로 연구하여 전산시뮬한 결과와 비교하였다. 실험적으로 빔의 세기가 증가함에 따라 어두운 솔리톤의 폭이 감소하고 배경의 폭은 증가함을 확인하였고 무한한 폭의 배경을 가정한 솔리톤 상수로부터 구한 굴절율의 변화량은 Z-스캔 방법으로 구한 굴절율의 변화량보다 작았다. 유한한 폭을 갖는 배경에 놓인 기본 어두운 솔리톤의 진행을 전산시뮬하여 진행거리에 따른 배경의 첨두세기, 어두운 솔리톤의 폭 그리고 솔리톤 상수의 변화를 연구하였다. 유한한 크기의 배경에서 솔리톤상수의 변화를 고려하여 구한 굴절율의 변화량은 Z-스캔 방법으로 구한 굴절율의 변화량과 일치하였다.

### I. 서 론

광솔리톤(optical solitons)은 광 커(optical Kerr) 매질에서 빔의 세기에 따른 굴절율의 변화량이 시간솔리톤(temporal soliton)의 경우에는 펄스 분산(pulse dispersion), 공간솔리톤(spatial soliton)의 경우에는 빔 회절 (beam diffraction)과의 상호 상쇄작용에 의해 나타나는 현상이다.<sup>[1]</sup> 먼 거리를 진행하는 동안에도 형태의 변화가 없다는 솔리톤의 특성으로 광섬유에서 시간솔리톤의 장거리 송신이 가능하므로 극초단 펄스를 이용한 초고속, 대용량의 광통신에 응용하기 위하여 많은 연구가 되고 있다.<sup>[1,2]</sup> 시간솔리톤과 같은 비선형 슈뢰딩거 방정식으로 기술되는 공간솔리톤은 자기유도 광도파로(self-induced waveguide)의 성질을 이용한 광 스위칭, 광 프로세싱 등에 응용될 수 있다.<sup>[3,4]</sup> 공간솔리톤은 자기집속(self-focusing) 매질에서는 밝은 솔리톤으로, 자기확산(self-defocusing) 매질에서는 어두운 솔리톤의 형태로 존재할 수 있다.

밝은 공간솔리톤은(1+1) 차원의 슬랩(slab)에서 관측되었으나(1+2) 차원에서는 불안정하여 존재하지 않는 것으로 알려져 있다.<sup>[5]</sup> 어두운 공간솔리톤은 횡축(transverse coordinate)방향으로 커질수록 빔의 세기가 영이

아닌 일정한 값을 배경으로 갖고 여기된 어두운 솔리톤의 중심에서 빔의 세기가 최소가 되며 어두운 정도(blackness)에 따라 특정한 위상형태를 갖는다.<sup>[6,7]</sup> 엄격한 의미의 어두운 솔리톤의 경우에 솔리톤이 변함없이 진행하기 위해서는 무한대의 에너지를 갖는 배경이 있어야 한다. 그러나 일정한 크기의 폭을 갖는 빔을 배경으로 하여 중심부근에서 어두운 솔리톤과 같은 형태의 세기 및 위상형태를 갖으며 먼 거리를 진행하는 동안이나 그들간의 충돌 전후에도 변화가 없는 어두운 솔리톤은 관측될 수 있다.<sup>[8,9]</sup> 어두운 공간솔리톤은(1+2) 차원에서 스트립(strips) 또는 격자(grid)의 형태로 관측되었는데, 그 결과는(1+1) 차원의 비선형 슈뢰딩거 방정식으로 예측한 것과 일치하였다.<sup>[10,11]</sup> 즉, (1+2) 차원에서의 어두운 솔리톤은 두 개의 독립적인 (1+1) 차원으로 분리해서 구성되었다고 할 수 있다.<sup>[6,11]</sup>

진폭과 위상의 여러가지 초기조건에 대한 전산시뮬에 따르면 어두운 정도가 1인 기본 어두운 솔리톤은 중심에서 빔의 세기가 영이고  $\pi$  만큼의 갑작스런 위상차이도 있어야 한다.<sup>[7]</sup> 본 논문에서는 위상마스크(phase mask)를 사용하여 초기조건을 만들고 일정한 크기의 폭을 갖는 강한 세기의 빔을 이용하여 기본 어두운 공간솔리톤(fundamental dark spatial solitons)의 진행특성을 (1+2) 차원에서 스트립의 형태로 실험적으로 연구하였다. 솔리톤의 진행을 기술하는 비선형 슈뢰딩거 방정식을 유도하고, 유한한 크기의 폭을 갖는 배경에서 어두운 솔

\*본 연구는 한국원자력연구소 원자력 중장기 위탁연구비와 1995년도 교육부 기초과학육성연구비의 지원으로 이루어졌음.

리톤의 진행을 (1+1) 차원의 비선형 슈뢰딩거 방정식을 전산시뮬하여 실험결과와 비교하였다.

### II. 비선형 슈뢰딩거 방정식

굴절율  $n(I)$ 를 갖는 광 커(optical Kerr) 매질에서  $z$  방향으로 진행하는 빔은 다음과 같은 Helmholtz 방정식으로 기술된다.

$$(\nabla^2 + n^2(I)k_0^2)E = 0, \text{ where } E = Ue^{i(kz - \omega t)} \quad (1)$$

여기서  $U$ 는 전기장의 진폭,  $k = nk_0$ 는 매질내에서의 파수이다. 굴절율은  $n(I) = n_0 + n_2|E|^2/2 = n_0 + \gamma I$ 로 빔의 세기( $I$ )에 따른 굴절율의 변화를 포함한다. 진폭의 변화가 빔의 진행방향( $z$ )에 따라서는 작고  $y$  방향으로는 변하지 않는다고 가정하면 우리가 관측하고자 하는 공간솔리톤은 빔의 단면인  $x$  방향에 있다. 빔의 세기에 따른 굴절율의 변화가 선형굴절율보다 매우 작다면 ( $|\gamma I| \ll n_0$ ) 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$2in_0k_0 \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2\gamma n_0 k_0^2 |U|^2 U \quad (2)$$

우변의 첫번째 항은 회절을 나타내고, 두번째 항은 빔의 세기에 의존하는 자기위상변조(self-phase modulation)를 나타낸다. 즉, 회절에 의하여 증가되는 파수벡터의 수직성분이 자기위상변조에 의하여 보상된다면 진행 거리에 무관하게 진폭의 변화가 없는 솔리톤이 된다.

위의 식은  $\gamma < 0$ 인 자기확산의 매질에서 다음과 같은 (1+1) 차원의 비선형 슈뢰딩거 방정식(Nonlinear Schrödinger Equation: NLSE)으로 규격화된다.<sup>[9]</sup>

$$i \frac{\partial A}{\partial Z} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial X^2} - |A|^2 A \quad (3)$$

단, 여기서 규격화된 진폭과 좌표는 다음과 같다.

$$A = \frac{U}{U_0}, U_0 = \frac{1}{ka} \sqrt{\frac{n_0}{|n_2|}} \quad (3-1)$$

$$Z = \frac{z}{z_0}, z_0 = ka^2 \quad (3-2)$$

$$X = \frac{x}{x_0}, x_0 = a \quad (3-3)$$

여기서  $a$ 는 규격화 상수로 어두운 솔리톤의 폭과 관계지을 수 있다. 비선형 슈뢰딩거 방정식의 해들 중의 하나인 규격화된 진폭  $A = A_p \tanh(A_p X) e^{-A_p^2 z}$ 로서 입사빔의

세기와 관계없이 중심에서 빔의 세기가 영(어두운 정도 = 1)이고  $\pi$  만큼의 감작스런 위상차가 있는 것으로 기본 어두운 솔리톤(fundamental dark soliton) 또는 검은 솔리톤(black soliton)이라 한다.<sup>[7]</sup> 규격화된 어두운 솔리톤의 세기는  $A_p^2$ 이고 전반치폭(FWHM)는  $1.76/A_p$ 이므로 식 (3-1, 3)을 이용하면 다음과 같은 솔리톤 상수를 얻을 수 있다.<sup>[4,11]</sup>

$$I_p \Delta^2_{FWHM} = \frac{1.76^2}{|\gamma| n_0 k_0^2} \quad (4)$$

여기서  $I_p = |U|^2$ 는 빔의 세기를 나타내고  $\Delta_{FWHM}$ 는 어두운 솔리톤의 전반치폭을 나타낸다. 식 (4)의 우변은 빔의 파장과 매질의 특성으로 결정되는 값이므로 무한한 폭을 갖는 배경에서 진행하는 어두운 솔리톤은 빔의 세기와 전반치폭의 제곱의 곱이 항상 일정하여야 한다. 즉, 어두운 솔리톤이 생성되면 빔의 세기가 증가함에 따라 솔리톤의 폭이 줄어야 한다.

### III. 실험 및 결과

본 연구는 횡방향( $x$ )에서 빛의 세기에 따른 빔 모양의 변화를 관측하는 것이므로 실험에서는 직경이 1.2 mm인 가우스 형태를 갖는 CW Mode-Locked Nd:YAG 레이저 (ANTARES Mod. 76s, Coherent Inc.)의 제 2 고조파인 파장 532 nm의 빔을 광원으로 사용하였다. 레이저 빔의 펄스폭은 대략 80 psec, 반복율은 76 MHz, 평균출력은 1 W였다. 그리고 시료로는 비선형성이 크며 광학실험에서 3차 비선형성의 기준으로 널리 이용되고 있는  $CS_2$ 를 1 mm 두께의 수정셀에 넣어 사용하였다. 시료는 열적인 요인으로 자기확산의 비선형 현상을 보였다.

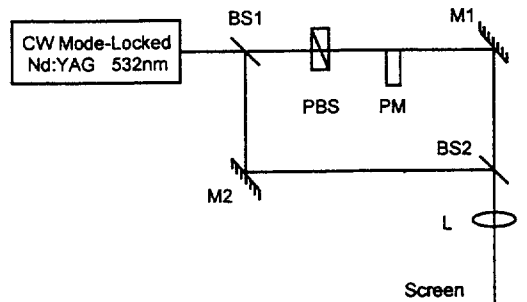


그림 1. 어두운 솔리톤의 초기위상을 확인하기 위한 간섭계  
PM: phase mask, BS's: beam splitter, M's: mirror, PBS: polarizing beam splitter, L: lens.

어두운 공간솔리톤을 관측하기 위한 초기조건으로  $\pi$ 만큼 위상차를 주기 위하여 두께  $150\ \mu\text{m}$ 의 투명한 유리판을 위상마스크(phase mask)로 사용하였다. 위상마

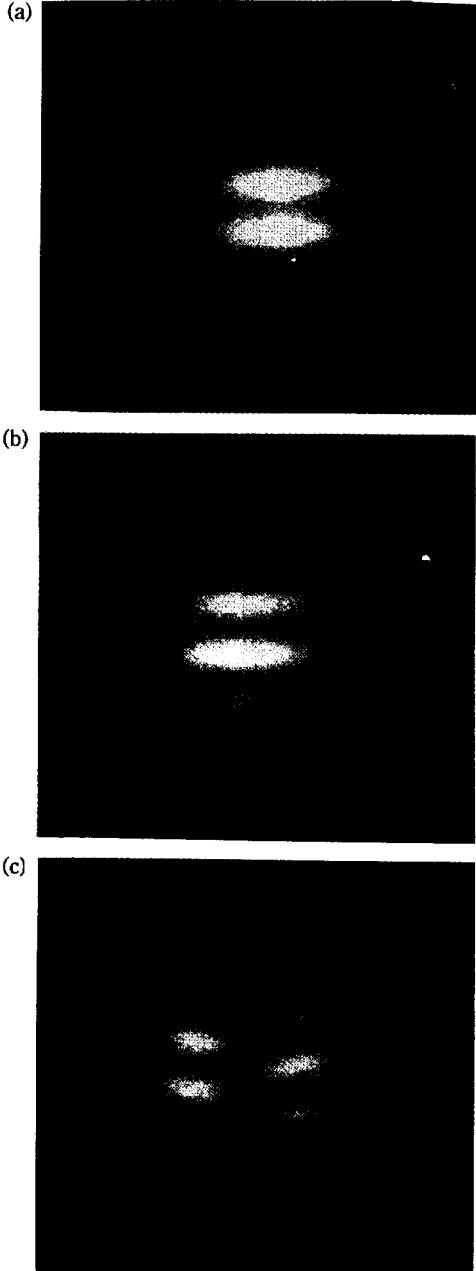


그림 2. (a) 위상마스크를 사용하지 않았을 때의 간섭무늬, (b) 위상마스크를 사용하여 위상차가 없는 경우의 간섭무늬, (c) 위상마스크를 사용하여 위상차가  $\pi$ 인 경우의 간섭무늬.

스크를 회전판위에 고정시킨 후 빔의 난이 위상마스크를 통과하도록 놓고 위상마스크의 회전으로 위상차를 연속적으로 조절하였다. 위상차의 변화를 확인하기 위하여 간섭현상을 관측할 수 있는 실험장치를 그림 1과 같이 구성하였다. 빔의 가간섭성 길이(coherence length)가 시료의 두께보다 길기 때문에 빔의 경로차를 조절하기 위한 경로지연선(path delay line)은 따로 구성하지 않았다. 빔살가르개(BS1)로 빔을 갈라서 하나는 위상변화 없이 지나게 하고 다른 하나는 빔의 난이 위상변화가 생기게 위상마스크(PM)가 있는 부분을 지나게 한 후에 빔을 모아 스크린에 확대하였다. 편광빔살가르개(PBS2)로 간섭현상을 일으키는 두 빔의 상대적인 세기를 조절한 후, 위상마스크를 미세하게 회전시키며 스크린에 나타나는 간섭무늬로 위상차를 확인하는 그림 2를 얻었다. 그림 2(a)는 위상마스크를 사용하지 않았을 때의 간섭무늬이고, (b)는 위상차가 없을 때의 간섭무늬이고, (c)는 위상차가  $\pi$ 만큼 있을 때의 간섭무늬로서 빔의 오른쪽 부분이 위상마스크에 의하여 위상변화가 가해진 부분이다. 위상차가 없을 경우 빔의 왼쪽, 오른쪽에 있는 간섭무늬가 연속적이지만 위상차가  $\pi$ 인 경우에는 간섭무늬가 서로 완전히 어긋나 있음을 확인하였다.

어두운 공간솔리톤의 진행특성을 관측하기 위하여 그림 3과 같은 실험장치를 구성하였다. 간섭무늬의 변화로 확인한 위상마스크의 각도를 위상차가  $\pi$ 가 되도록 유지하였으며 빔의 세기를 증가시키기 위하여 초점거리가  $35\ \text{mm}$ 인 렌즈(L1)로 빔을 집속시키고 시료를 통과한 빔을 초점거리가  $35\ \text{mm}$ 인 렌즈(L2)로 평행광이 되게 하였다. 이 때 집속된 빔의 직경은  $22\ \mu\text{m}$ 이었다. 편광빔살가르개(PBS)는 시료에 들어가는 빔의 세기를 조절하기 위한 것이고 빔살감쇄기(BA)는 1차원의 CCD 검

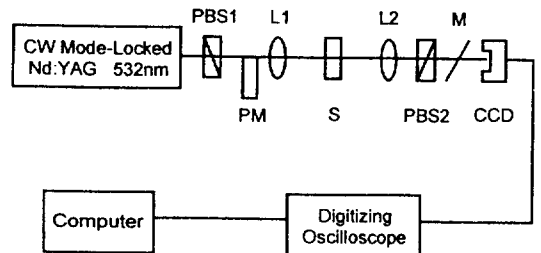


그림 3. 어두운 공간솔리톤의 진행특성을 관측하기 위한 실험장치도.

PM: phase mask, PBS: polarizing beam splitter, L's: lens, BA: beam attenuator, M: total reflecting mirror, CCD: one-dimensional charge-coupled device.

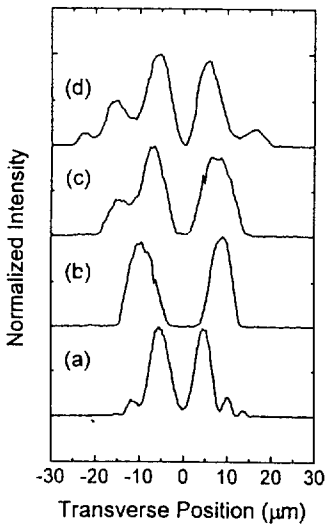


그림 4. 빔의 세기에 따른 빔 모양의 변화.  
 (a) 시료에 입사되는 빔의 모양, (b) 빔의 세기가 약하여 비선형 효과가 없고 회절만 있는 경우, (c) 배경의 침두세기가 35 MW/cm<sup>2</sup>인 경우, (d) 배경의 침두세기가 70 MW/cm<sup>2</sup>인 경우 빔의 모양.

출기 (BP2048, UniData Inc.)에 들어가는 빔의 세기를 조절하기 위한 것이다. CCD 검출기가 약한 빔에도 매우 민감하므로 전반사경(M)을 앞에 두었다. CCD 검출기로 측정된 신호는 디지털화 오실로스코프(digitizing oscilloscope)를 통하여 컴퓨터로 읽어 들었다.

빔의 세기에 따른 빔 모양의 변화를 측정하여 시료의 출력면에서의 크기로 나타내어 그림 4의 결과를 얻었다. 그림 4(a)는 시료에 들어가는 빔모양이고 (b)는 빔의 세기가 작아서 비선형 효과가 나타나지 않고 회절 효과만 있어서 가운데 부분에서 어두운 골이 넓게 형성되었다. (c)는 빔의 침두세기가 35 MW/cm<sup>2</sup>, (d)는 70 MW/cm<sup>2</sup>로 비선형 효과가 강하게 나타나는 경우이다. 빔의 세기가 증가함에 따라 시료의 비선형 현상에 따른 자기확산현상이 증가함에 따라 가운데 부분에 있는 어두운 솔리톤의 폭이 줄어들고 빔의 전체적인 폭은 증가하였다. 이는 이론에서 보았듯이 빔의 세기와 어두운 솔리톤의 폭의 제곱의 곱이 일정하게 유지되려는 어두운 솔리톤의 특성 때문이다.

기본 어두운 공간 솔리톤에서 빛의 세기에 따른 굴절율의 변화량  $\Delta n(\equiv \gamma I_p)$ 은 어두운 솔리톤의 전반치폭의 제곱에 반비례한다. 빔의 세기가 70 MW/cm<sup>2</sup>인 경우에 전반치폭은 대략 5.6  $\mu\text{m}$ 였는데 식 (4)로부터 계산된 굴

절율의 변화량  $\Delta n$ 은  $-4.3 \times 10^{-4}$ 이었다. 빔의 세기가 35 MW/cm<sup>2</sup>인 경우에도 계산된 굴절율의 변화량은 거의 일치하였다.

위의 결과를 비교하기 위하여 Z-스캔 방법으로 빔의 세기에 따른 굴절율의 변화량을 측정하였다.<sup>[12,13]</sup> 순간적인 비선형성을 가정하고 CW(continuous wave) 빔을 입사시켜 비선형성이 정상상태인 경우에 규격화된 투과율의 변화에서 마루의 최대 투과율과 골의 최소 투과율의 차이  $\Delta T_{p,v}(\equiv T_p - T_v)$ 는 위상변화량  $\Delta \Phi_0$ 에 거의 선형적으로 비례하며 다음과 같이 기술된다.<sup>[13]</sup>

$$\Delta T_{p,v} \approx 0.406 (1-S)^{0.25} |\Delta \Phi_0| \leq, \text{ 단 } |\Delta \Phi_0| \leq \pi \quad (5)$$

여기서 S는 Z-스캔 실험에서 조리개의 선형투과도이다. M. Sheik-Bahae 등은 수치계산으로 위상변화량이 작은 경우에 ( $|\Delta \Phi_0| \leq \pi$ ) 식 (5)는 비선형굴절율의 변화량을 얻는데 거의 정확하게 적용될 수 있음을 보였다. 광원으로 CW가 아닌 펄스를 사용하면 위상변화량의 평균과 굴절율 변화량의 평균,  $\langle \Delta n_0(t) \rangle$ 은 다음과 같은 관계가 있다.<sup>[13]</sup>

$$|\Delta \Phi_0(t)| = k_0 \langle \Delta n_0(t) \rangle L_{\text{eff}} \quad (6)$$

여기서  $k_0$ 는 진공에서의 파수이고  $L_{\text{eff}}$ 는 시료의 유효 두께이다. 실험에서 사용된 조리개의 선형투과도는 0.037이었다. 빔의 세기를 줄여서 침두세기가 20 MW/cm<sup>2</sup>인 경우에 규격화된 투과율의 변화가 0.325, 즉 위상변화량의 평균이 0.80이었다. 빔의 침두세기가 70 MW/cm<sup>2</sup>인 경우로 계산하면 굴절율 변화량의 평균,  $\langle \Delta n_0(t) \rangle$ 은  $-2.8 \times 10^{-4}$ 이었다. 시료의 반응시간이 펄스폭보다 긴 열적요소인과 같은 측정된 비선형성을 고려하면 빔의 침두세기에서의 굴절율 변화량은 평균변화량의 두 배가 된다.<sup>[13]</sup> 즉, 빔의 침두세기 70 MW/cm<sup>2</sup>에 의한 굴절율의 변화량,  $\Delta n$ 은  $-5.6 \times 10^{-4}$ 이다. Z-스캔 방법으로 얻은 굴절율의 변화량이 솔리톤 실험에서 얻은 굴절율의 변화량보다 크다. 이러한 차이를 이해하기 위하여 여러가지 크기의 폭을 갖는 배경이 어두운 솔리톤의 진행에 어떤 영향을 미치는지 전산시뮬하였다.

#### IV. 전산시뮬

(1+1) 차원의 비선형 슈뢰딩거 방정식, 식 (3)에서 가우스 형태의 배경에 규격화된 세기가 1인 기본 어두운 솔리톤이 있는 다음과 같은 초기조건을 고려하자.<sup>[7,8]</sup>

$$A = \tanh(X) e^{-\alpha W_0^2} \quad (7)$$

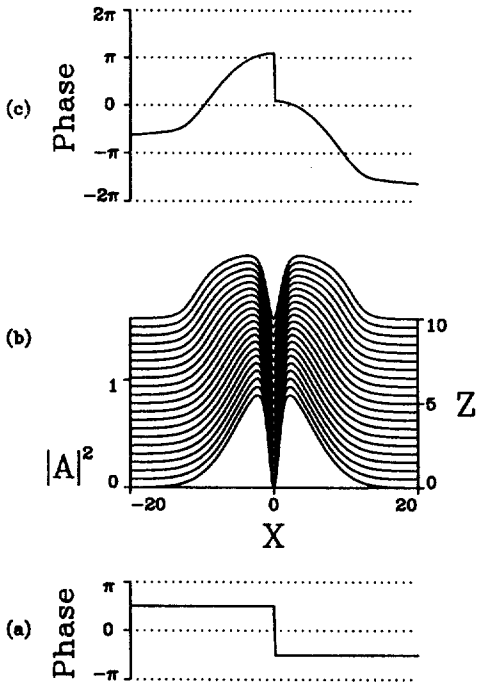


그림 5. 배경의 폭  $W_G=10$ 일 때 진행거리에 따른 기본 어두운 솔리톤의 진행특성. (a)  $Z=0$ 에서의 위상형태, (b)  $Z=0$ 에서  $Z=10$ 까지 세기의 변화, (c)  $Z=10$ 일 때의 위상형태.

여기서  $W_G$ 는 배경의 폭을 나타낸다.  $W_G=10$ 인 경우에 비선형 슈뢰딩거 방정식으로 전산시뮬한 결과를 나타낸 것이 그림 5이다. 그림 5(a)는  $Z=0$ 에서의 위상형태를 나타낸 것이고, (b)는  $Z=0$ 에서  $Z=1$ 까지 진행거리에 따른 세기의 변화를 나타낸 것이고, 그리고 (c)는  $Z=10$ 일 때의 위상형태를 나타낸 것이다. 그림 5(b)를 보면 진행거리가 증가함에 따라 배경의 폭은 증가하면서 그 세기는 줄어들지만 중심에 있는 어두운 솔리톤의 폭은 증가함을 알 수 있다. 그림 5(a)와 (c)를 비교해 보면 배경의 세기변화 때문에 위상변화가 연속적으로 나타나지만 중심에서는  $\pi$ 만큼의 갑작스런 위상차가 유지되고 있음을 알 수 있다. 즉, 유한한 크기의 폭을 갖는 배경에서 어두운 솔리톤의 세기와 폭은 변하지만 위상특성은 유지되면서 진행함을 알 수 있다. 위의 결과로부터 유한한 크기의 폭을 갖는 배경에서 진행거리에 따라 솔리톤 상수는 어떻게 변화하는지 규격화하여 나타낸 것이 그림 6이다. 그림 6(a)는 배경의 침투세기( $I_p$ )를 나타낸 것이고, (c)는 어두운 솔리톤의 전반치폭의 제곱( $\Delta_{FWHM}^2$ )을 나타낸 것이고, (b)는 어두운 솔리톤의 전반치폭과 배경의 침투세기로부터 계산된 규격화된 솔리톤 상수( $I_p \Delta_{FWHM}^2$ )

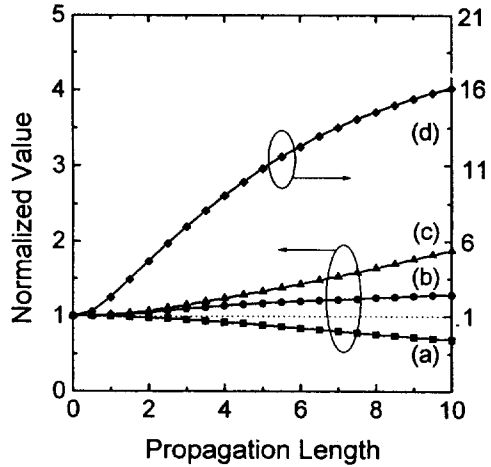


그림 6. 배경의 폭  $W_G=10$ 일 때 진행거리에 따른 규격화된 솔리톤 상수의 변화. (a) 배경의 침투세기 ( $I_p$ ), (b) 솔리톤 상수 ( $I_p \Delta_{FWHM}^2$ ), (c) 어두운 솔리톤의 전반치폭의 제곱 ( $\Delta_{FWHM}^2$ ), (d) 비선형 효과가 최절만 있을 때의 솔리톤 상수.

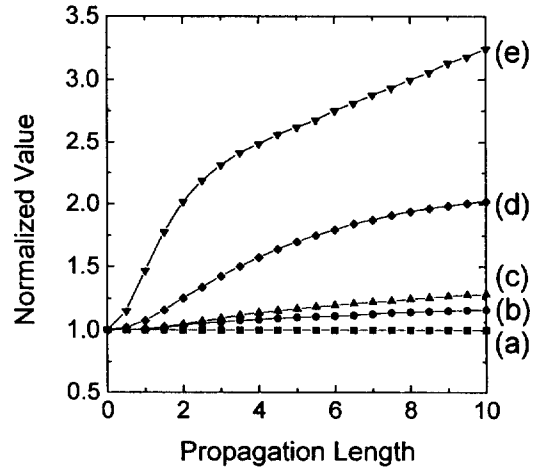


그림 7. 여러가지 유한한 크기의 폭을 갖는 배경에서 진행거리에 따른 규격화된 솔리톤 상수의 변화. 배경의 폭,  $W_G$ 가 각각 (a)  $\infty$ , (b) 15, (c) 10, (d) 5, (e) 3인 경우.

이다. 진행거리가 증가함에 따라 솔리톤 상수의 값이 증가하는 것으로 보아 엄격한 의미의 어두운 솔리톤의 형태는 유지되지 않는다. 어두운 솔리톤의 전반치폭이 증가하는 효과가 배경의 침투세기가 감소하는 효과보다 강하여 규격화된 솔리톤 상수가 증가한다. 같은 초기조건에서 비선형 슈뢰딩거 방정식의 비선형 현상없이 회

절만 있을 때 전산시뮬하여 규격화된 솔리톤 상수를 나타낸 것이 그림 6(d)이다. 그림 6(b)와 (d)를 비교해 보면, 유한한 폭을 갖는 배경에서도 비선형 현상에 의하여 회절효과가 상쇄된다면 솔리톤 상수가 거의 일정하게 유지된다고 할 수 있다. 배경의 폭( $W_0$ )이 각각 3, 5, 10, 15인 경우에 전산시뮬한 결과로부터 얻은 규격화된 솔리톤 상수를 나타낸 것이 그림 7이다. 배경의 폭이 무한한 경우에는 솔리톤 상수가 변하지 않고 일정하지만 배경의 폭이 작아질수록 솔리톤 상수는 증가한다. 배경의 폭이 5인 경우에 진행거리가 10이 되면 솔리톤 상수는 2배 정도 증가한다.

위의 전산시뮬 결과를 실험 결과와 비교해 보자. 어두운 솔리톤의 배경이 유한한 크기의 폭을 가지면 진행거리가 증가함에 따라 빔의 침투세기가 감소하는 효과보다 어두운 솔리톤의 전반치폭이 증가하는 효과가 더 강해서 솔리톤 상수로부터 구한 굴절율의 변화량은 실제보다 작아질 것이다. 규격화 상수  $a$ 를 어두운 솔리톤의 전반치폭으로 하면 시료의 규격화된 진행거리는 대략 2 정도이다. 배경의 폭을 대략 5라고 하면 솔리톤 상수는 그림 7로부터 1.3배 정도 커졌다고 할 수 있다. 진행거리가 작은 경우에는 그림 6에서 보듯이 배경의 침투세기는 거의 변화가 없고 솔리톤 상수의 변화는 주로 솔리톤의 폭의 변화때문이다. 따라서 솔리톤 상수로부터 구한 굴절율의 변화량은 실제 굴절율의 변화량보다 1.3배 정도 작은 것이다. 이를 솔리톤 상수로부터 구한 굴절율의 변화량에 적용하면 실제 굴절율의 변화량은 대략  $-5.6 \times 10^{-4}$ 이 되므로 Z-스캔 방법으로 구한 굴절율의 변화량과 일치한다. 기본 어두운 공간솔리톤 실험에서 솔리톤 상수로부터 구한 굴절율의 변화량은 Z-스캔 방법으로 구한 굴절율의 변화량보다 작은 것은 배경이 유한한 크기의 폭을 갖기 때문으로 해석된다. 그러므로 솔리톤 상수로부터 구한 굴절율의 변화량은 유한한 크기의 배경에서 진행거리에 따른 솔리톤 상수의 변화를 고려하여 보정되어야 한다.

## V. 결 론

무한한 크기가 아닌 유한한 크기의 폭을 갖는 배경에서 기본 어두운 공간솔리톤의 진행특성을 위상마스크를 사용하여 비선형성이 강한 액체 매질에서 (1+2) 차원의 스트립의 형태로 실험적으로 연구하였다. 솔리톤의 진행을 기술하는 비선형 슈뢰딩거 방정식으로부터 기본 어두운 솔리톤은 세기와 폭의 제곱의 곱이 일정한 솔리톤 상수를 가짐을 알았다. 실험적으로 빔의 세기가 증가함에

따라 어두운 솔리톤의 폭은 감소하였으나 자기확산 효과에 의하여 배경의 폭은 증가하였음을 확인하였다. 무한한 크기의 폭을 배경을 가정한 솔리톤 상수로부터 구한 굴절율의 변화량은 Z-스캔 방법으로 구한 굴절율의 변화량보다 작게 나왔다. 유한한 폭을 갖는 배경에 놓인 기본 어두운 솔리톤의 진행을 (1+1) 차원의 비선형 슈뢰딩거 방정식을 전산시뮬하여 진행거리에 따른 배경의 침투세기, 어두운 솔리톤의 폭 그리고 솔리톤 상수의 변화를 알아 보았다. 유한한 크기의 배경에서 솔리톤 상수의 변화를 고려하여 보정한 굴절율의 변화량은 Z-스캔 방법으로 구한 굴절율의 변화량과 일치하였다. 즉, 유한한 폭의 배경에서 (1+2) 차원의 어두운 공간 솔리톤의 진행특성은 (1+1) 차원의 비선형 슈뢰딩거 방정식으로 예측한 것과 일치하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. R. Taylor, ed., *Optical Solitons-Theory and Experiment*(Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1992).; G. P. Agrawal, "Optical Solitons", in *Contemporary Nonlinear Optics*, edited by G. P. Agrawal, and R. W. Boyd, (Academic Press, San Diego, Calif., 1992).
- [2] Y. Kodama, A. Maruta, and A. Hasegawa, *Quantum Opt.* **6**, 463 (1994).
- [3] B. Luther-Davies and X. Yang, *Opt. Lett.* **17**, 496 (1992).
- [4] P. V. Mamyshev, C. Bosshardm, and G. I. Stegeman, *J. Opt. Soc. Am.* **B11**, 1254 (1994).
- [5] R. De La Fluente, A. Barthelemy, and C. Froehly, *Opt. Lett.* **16**, 793 (1991).
- [6] Y. S. Kivshar, *IEEE J. Quantum Electron.* **29**, 250 (1993).
- [7] 김광훈, 윤선현, 문희종, 임용식, 이재형, 장준성, *한국광학회지*, **5**, 238 (1994).
- [8] W. J. Tomlinson, R. J. Hawkins, A. M. Weiner, J. P. Herifage, and R. N. Thurston, *J. Opt. Soc. Am.* **B6**, 329 (1989).
- [9] R. N. Thurston and A. M. Weiner, *J. Opt. Soc. Am.* **B8**, 471 (1991).
- [10] G. A. Swartzlander, Jr., D. R. Anderson, J. J. Regan, H. Yin, and A. E. Kaplan, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 1583 (1991).; G. R. Allan, S. R. Skinner, D. R. Anderson, and A. L. Smirl, *Opt. Lett.* **16**, 156 (1991).
- [11] D. R. Anderson, D. E. Hooton, G. A. Swartzlander, Jr., and A. E. Kaplan, *Opt. Lett.* **15**, 783

- (1990).
- [12] M. Sheik-bahae, A. A. Said, and E. W. Van Stryland, *Opt. Lett.* **14**, 955 (1989).; 이범구, *한국광학회지*, **4**, 428 (1993).
- [13] M. Sheik-bahae, A. A. Said, T. H. Wei, D. J. Hagan, and E. W. Van Stryland, *IEEE J. Quantum Electron.* **26**, 760 (1990).

### **Propagation Characteristics of Fundamental Dark Spatial Solitons on Finite-width Backgrounds**

Guang-Hoon Kim, Hee-Jong Moon, Yong-Sik Lim,  
Jai-Hyung Lee and Joon-Sung Chang

*Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

(Received: May 9, 1995)

We have studied experimentally the propagation characteristics of fundamental dark spatial solitons on finite-width backgrounds and compared with the result of numerical simulations. It was verified experimentally that the width of dark solitons decreased but that of background increased as the beam intensity increased. The refractive index change obtained from soliton constant, which is for infinite-width background, was smaller than that from Z-scan method. Numerical simulations of fundamental dark solitons on a finite-width backgrounds showed that the peak intensity of background, the width of dark soliton and the soliton constant varied with the propagation length. If the change of soliton constant on finite-width backgrounds was considered, the refractive index change was in good agreement with that from Z-scan method.