

굽은 비선형 도파로를 이용한 솔리톤 결합기

정준영 · 강병한 · 정제명

한양대학교 전파공학과

(1999년 8월 6일 받음, 1999년 11월 18일 수정본 받음)

본 논문에서는 굽은 비선형 도파로를 이용한 솔리톤 결합기의 동작 특성에 대해 알아보았다. 이 굽은형 솔리톤 결합기는 기존의 솔리톤 결합기와 마찬가지로, 비선형 도파로에서의 솔리톤 방출의 문턱값 효과로 인해 매우 날카로운 스위칭 특성을 갖는다. 또한 이 결합기의 굽은 구조는 솔리톤 방출을 위해 요구되는 최소 입력 파워의 문턱값을 낮추어 준다. 굽은형 솔리톤 결합기를 통한 파의 전송을 보다 정확하고 실제적으로 수치 해석하기 위해 비선형성의 포화 효과와 매질에서의 손실을 고려하였다. 시뮬레이션 결과는 포화 효과와 손실을 고려하는 것이 비선형 도파로 소자의 해석과 설계에 있어서 매우 중요하다는 것을 보여주고 있다. 이러한 굽은 구조의 적용은 포화 효과와 손실을 고려했을 때, 낮은 문턱값 파워를 가지고 공간 솔리톤을 방출시키는데 유용하다.

I. 서 론

최근 Kerr 매질에서의 공간 솔리톤(spatial soliton)의 독특한 특성은 많은 주목을 받고 있으며, 왕성한 이론적^[1,2]·실험적^[3,4] 연구 활동을 유발시키고 있다. 이는 큰 왜곡 없이 펄스가 그 파형을 유지하며 전파되고, 상호작용이 일어날 때에는 일종의 입자처럼 작용하는 등의 솔리톤의 독특한 특성이 빛으로써 빛을 제어하고 조절하는 것을 가능하게 하기 때문이다. 따라서 이러한 솔리톤의 특성은 초고속 신호 처리 및 원거리 통신 기술, 그리고 완전 광 스위치와 완전 광 논리 소자와 같은 완전 광 집적 소자 등의 분야에 응용 가능성을 갖고 있다. D. R. Heatley^[5] 등은 두 인접한 도파로 사이의 에너지 전달에 솔리톤을 활용하는 솔리톤 결합기를 제안하였는데, 비선형 도파로에서의 솔리톤 방출의 문턱값 효과로 인하여 이 솔리톤 결합기는 입력 파워에 따른 매우 가파른 스위칭 특성을 보인다.

한편, K. Ogusu^[6]와 W. C. Chang 등^[7]은 굽은 비선형 유전체 접촉면을 따라 진행하는 비선형파에 대해 연구하였는데, 이 비선형파의 전파 특성은 굽은 비선형 유전체 접촉면의 공간적 구조에 크게 의존한다. 최근에는 이러한 굽은 비선형 구조를 이용한 완전 광 논리 소자^[8]가 제안되기도 하였으며, P. L. Fan 등^[9]은 동각 사상(conformal mapping)법을 이용하여 이러한 굽은 구조를 보다 정확하게 해석할 수 있는 방법을 제시하기도 하였다. 한편, 최고 입력 파워가 매우 큰 짧은 펄스의 경우, 입력파의 세기에 의한 굴절률의 변화는 일반적으로 알려진 Kerr 효과만으로는 표현할 수 없다. 따라서 이러한 경우, 보다 실제적인 해석을 위해 비선형성의 포화 효과^[10]가 고려되어야만 한다. 또한 Kerr-type 비선형 매질에서의 굴절률의 변화는 전계 세기의 제곱에 대한 함수이므로, 손실(loss)에 의한 전계 세기의 감소를 고려하는 것 또한 보다 정확하고 실제적인 해석을 위해 필요하다. P. A. Buah 등^[11]은 이러한 손실을 보상하기 위해 이득 물질을 사용하여, 결과적으로 더욱

가파른 솔리톤 스위칭 특성을 지닌 다른 형태의 결합기를 제안하기도 하였다. 그러나 대부분의 경우, 입력파의 진행 거리가 비교적 짧기 때문에 진행 과정에서 발생하는 손실의 영향을 무시할 수 있다고 가정한다.

본 논문에서는 솔리톤 결합기에 굽은 구조를 도입한 굽은형 솔리톤 결합기의 동작 특성을 알아보았다. 이러한 구조의 결합기에 대해 매질에서의 손실과 비선형성의 포화 효과를 고려한 후, 입력 전계의 세기와 굽은 구조의 굽은 각도, 그리고 포화 패러미터 값을 변화시켜 가면서 기존의 솔리톤 결합기와 스위칭 특성을 비교하여 보았다. 이러한 연구를 위한 수치 해석법으로 유한 차분 빔 전파법(Finite Difference Beam Propagation Method: FD-BPM)^[12]과 투명 경계 조건(Transparent Boundary Condition: TBC)^[13]이 이용되었다.

2장에서는 굽은형 솔리톤 결합기의 기본 구조 및 동작 원리에 대해 알아보았다. 3장에서는 2장의 내용을 토대로 입력 전계의 세기와 굽은 구조의 굽은 각도, 그리고 포화 패러미터 값을 변화시켜 가면서 굽은형 솔리톤 결합기의 스위칭 특성을 알아보았다. 또한 광 도파로에서의 손실을 고려했을 때 발생하는 결합기의 스위칭 특성 변화도 살펴보았다. 4장에서는 3장의 수치 해석을 통해 결론을 내렸다.

II. 기본 구조 및 동작 원리

본 장에서는 굽은형 솔리톤 결합기의 기본 구조와 동작 원리를 알아보도록 하겠다.

먼저, 굽은형 솔리톤 결합기의 기본 구조는 그림 1에 나타난 것과 같다. 그림 1에서 알 수 있듯이 이 굽은형 솔리톤 결합기도 기존의 솔리톤 결합기와 마찬가지로 동일한 방향(z-방향)으로 뻗어 있는 두 비선형 도파로로 구성된다. 즉, 입력파가 입사되는 도파로 1과 이 도파로 1에서 발생하여 공통의 클래딩 부분을 거쳐 진행해 온 솔리톤 파를 포획하는 도파로 2로 이루어져 있다. 그러나 기존과는 달리 도파로 1의 입력부

가 굽은 형태를 갖는 차이점을 보이고 있다. 이 굽은 부분의 길이는 l , 진행 방향에 대한 굽은 각도는 θ 이다. l 이나 θ 가 0이면 이 구조는 기존의 솔리톤 결합기와 동일한 구조가 된다.

한편, 그림 1에서 진하게 나타내어진 공통의 클래딩 부분과 도파로 2는 진행하는 파의 세기에 따라 그 굴절률 값이 변하는 비선형 매질로 이루어진다. 그 나머지 부분들은 모두 굴절률이 일정한 값을 갖는 선형 매질로 이루어진다. 각 부분들을 이루고 있는 매질들의 선형 굴절률은 그림 1에서 나타냈듯이 각각 n_{s1} , n_{t1} , n_c ($i=1, 2$)이다. 또한 두 도파로 사이의 간격(공통 클래딩부의 폭)과 도파로의 폭은 각각 $2D$ 와 d 의 값을 갖는다.

단일 주파수 ω 를 갖는 TE_0 모드의 입력파에 대해 생각해 보자. 이 파가 y -방향으로 편향되어 있고, z -방향으로 전파한다고 가정하면, 전계에 대한 표현식은 다음과 같아진다.

$$E(\vec{R}, t) = \frac{1}{2} \bar{Y} [E(x, z) e^{i(kz - \omega t)} + c.c.] \quad (1)$$

여기서 n_0 가 기본 굴절률일 때, $k = n_0 k_0 = n_0 \omega/c$ 이고, \bar{Y} 는 y -방향의 단위 벡터이며, $E(x, z)$ 는 전계의 스칼라 포락선이다.

매질에서의 흡수 손실을 무시하고, 전파하는 축방향으로부터 빔의 발산이 작다면, $E(x, z)$ 에 대한 Helmholtz 방정식은 식 (2)와 같은 Fresnel 방정식으로 단순화될 수 있다.

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + k^2 [n^2(x, |E|^2) - n_0^2] E = 0 \quad (2)$$

매질이 Kerr-type 비선형 매질일 경우, 비선형 계수를 α 라 하면, 일반적으로 매질의 굴절률은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$n^2(x, |E|^2) = n_0^2 + \alpha |E|^2 \quad (3)$$

한편, 최고 입력 파워가 매우 큰 짧은 펄스의 경우, 입력파의 세기에 의한 굴절률의 변화를 Kerr 효과만으로 표현할 수 없으므로, 보다 실제적인 해석을 위해 비선형성의 포화 효과가 고려되어야만 한다. 그 결과 비선형 매질에서의 굴절률에 대한 표현식은 다음과 같아진다.

$$n^2(x, |E|^2) = n_0^2 + \frac{\alpha |E|^2}{1 + \chi |E|^2} \quad (4)$$

여기서 $\chi=0$ 일 때, 식 (4)는 식 (3)과 동일해짐을 알 수 있다.

한편, 비선형 매질에서 발생 가능한 최대의 비선형 굴절률 변화량이 필름과 클래딩 사이의 선형 부정합보다 커야 솔리톤 방출이 일어날 수 있으므로, 작은 선형 부정합에 대해 식 (4)로부터 다음과 같은 근사 관계식^[14]이 얻어진다.

$$\alpha/\chi > n_f^2 - n_c^2 \quad (5)$$

다음 장의 수치 해석에 사용될 물리량에 식 (5)의 근사 관계식을 적용시키면, 대략 $\chi < 32\alpha$ 의 관계식이 얻어진다.

이제 이 굽은형 솔리톤 결합기의 동작 원리에 대해서 알아 보겠다. 이 굽은형 솔리톤 결합기의 동작 원리 또한 기존의 솔리톤 결합기와 차이가 없다. 단지 l , θ 등의 패러미터 값에 따라 기존과 다른 결과를 보인다는 것이 다를 뿐이다. 비선형

도파로에서의 솔리톤 방출은 그 입력파의 세기에 대해 어떤 문턱값을 갖는다. 즉, 입력파가 어느 일정한 값 이상의 파워를 지녀야만 솔리톤 방출이 일어나는 것이다. 이 솔리톤 방출에 대한 문턱값은 그 비선형 도파로의 구조와, 선형 굴절률과 비선형 계수 등 매질의 물리량에 의해 결정된다. 굽은형 솔리톤 결합기도 이와 같은 특성을 그대로 따른다. 즉, 굽은형 솔리톤 결합기의 구조 및 각 구성 매질의 물리량에 따라 그 문턱값이 결정되고, 입력파의 세기가 이 문턱값보다 더 클 때에만 솔리톤 방출이 일어나는 것이다. 즉, 문턱값 이하의 세기를 갖는 입력파는 도파로 1을 따라 진행하고, 문턱값 이상의 세기를 갖는 입력파는 비선형 매질 쪽으로 솔리톤을 발생시키는 것이다. 이렇게 비선형 도파로 1에서 발생한 솔리톤은 공통의 클래딩부를 거쳐서 도파로 2에 진입하게 된다. 비선형 매질이 이루어진 이 도파로 2는 공통의 클래딩 부분과 마찬가지로 솔리톤 파의 세기에 따라 그 굴절률의 크기가 증가하지만 공통의 클래딩 부분보다 상대적으로 큰 선형 굴절률을 갖고 있다. 즉, $n_2 > n_c$ 이다. 따라서 진입하는 솔리톤 파의 대부분은 도파로 2에 포획되어 도파로 2를 따라 진행하게 된다. 이와 같이 굽은형 솔리톤 결합기는 기존의 솔리톤 결합기와 마찬가지로 입력파의 세기에 따라 매우 가파른 스위칭 특성을 지니게 된다. 그렇지만 굽은형 솔리톤 결합기의 구조적 차이는 솔리톤 방출의 문턱값에 어떠한 변화를 줄 것이다.

한편, 굽은형 솔리톤 결합기의 구조적 패러미터 값들은 그 선택에 있어서 약간의 주의가 필요하다. 왜냐하면 잘못된 패러미터 선택은 굽은형 솔리톤 결합기의 오동작 및 성능 저하를 유발시킬 수 있기 때문이다. 이러한 패러미터에는 l , θ , 그리고 $2D$ 등이 있으며 각각을 신중하게 선택해야 하는 이유는

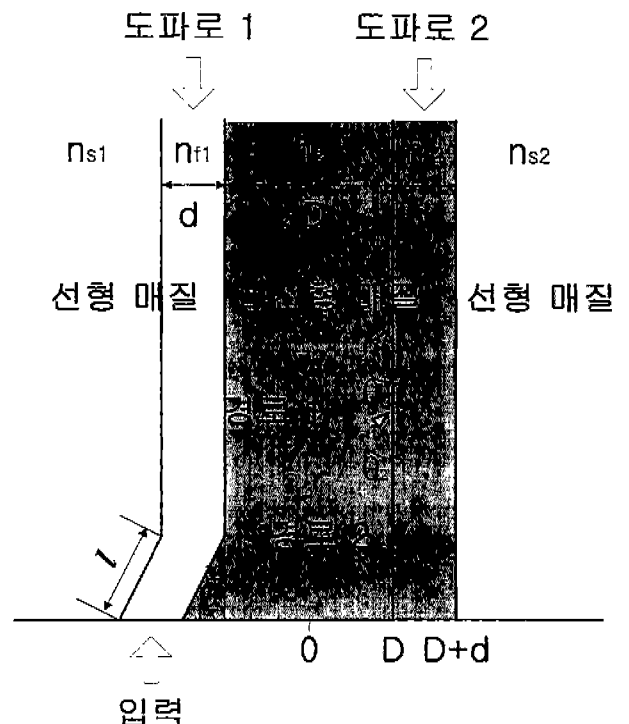


그림 1. 굽은형 솔리톤 결합기의 기본 구조.

다음과 같다.

먼저 l 의 경우, 그 값이 커지면 분체가 발생할 수 있다. 비선형 도파로에서 솔리톤 방출이 일어나기까지의 진행 거리는 일반적으로 입력파 세기가 증가함에 따라 감소한다. 즉, 입력파의 세기가 클수록 빨리 솔리톤 방출이 일어나게 되는 것이다. 그림 1에서 경로 1은 입력 파워가 크지 않아 솔리톤 방출이 일어나는 진행 거리가 l 보다 큰 경우로, 이때 도파로 2에 입사되는 솔리톤 파의 진행 각도를 θ_1 으로 나타내었다. 경로 2는 입력파의 세기가 커져서 솔리톤 방출이 일어나는 진행 거리가 굽은 부분의 길이 l 보다 짧은 경우로, 그림 1에서와 같이 도파로 1의 굽은 부분에서 솔리톤 방출이 일어나게 되면, 클래딩에서의 솔리톤 진행 각도 θ_2 가 전체 솔리톤 결합기의 진행 방향에서 많이 벗어나게 된다. 즉, $\theta_2 > \theta_1$ 이며, 이에 따라 솔리톤의 포획 정도가 도파로 2에서의 반사파^[15, 16]의 증가로 인하여 감소하게 될 것이다. 따라서 굽은 부분의 길이 l 은 사용할 입력파의 세기가 가장 큰 경우의 솔리톤 방출이 일어나는 진행 거리보다 충분히 짧게 선택되어야 한다.

θ 의 경우, 그 크기가 커지면 성능 저하를 일으킬 수 있다. 입력파의 세기가 문턱값 이하일 경우 입력파가 도파로 1에 완전히 갇힌 상태로 진행해야 되는데, θ 가 커지면 그 일부가 도파로 외부로 투과되는 손실(bending loss)을 일으키게 된다. 또한 솔리톤이 발생하는 경우에도 l 이 너무 긴 경우에서처럼 도파로 2에서의 입사 각도가 커지고, 그에 따라 도파로 2에서의 반사파가 증가하는 문제점이 발생하게 된다.

마지막으로 $2D$ 의 경우는 기존의 솔리톤 결합기와 동일한 조건을 적용시켜야 한다. 솔리톤 결합기는 선형 결합기와 달리 두 도파로 사이의 거리가 클 경우에도 입력파의 에너지를 이웃한 도파로로 전달할 수 있다. 그런데 솔리톤 결합기에 선형 결합기에서 일어나는 선형 커플링 현상이 일어나면 도파로 사이의 파의 진동적인 전달 특성으로 인해 문턱값 소자로서의 유용한 특성을 잃어버리게 된다. 따라서 솔리톤 결합기에서의 두 도파로 사이의 간격, $2D$ 는 선형 커플링 현상이 일어나지 않을 만큼 충분히 커야만 한다.

III. 수치 해석 및 결과

본 장에서는 2장에서 언급한 기초 지식을 바탕으로 그림 1의 굽은형 솔리톤 결합기에 대해 입력 전계의 세기와 굽은 구조의 굽은 각도, 그리고 포화 패러미터 값 등을 변화시켜 가면서 결합기의 스위칭 특성을 알아보겠다.

먼저 본 논문의 수치 해석에 고정적으로 사용된 패러미터 값들은 다음과 같다. 굽은형 솔리톤 결합기를 구성하는 각 매질의 선형 굴절률은 각각 $n_{si} = n_c = 1.55$, $n_{fi} = 1.56 (i = 1, 2)$ 이고, 비선형 매질에서의 비선형 계수 $\alpha = 3.3776 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{V}^2$ ^[17]이다. 입력파의 주파수는 $1.3 \mu\text{m}$ 이고, 입력되는 전계의 파형은 $E(x, 0) = \sqrt{P_{in}} E_0(x)$ 이다. 여기서 P_{in} 은 입력 파워이고, $E_0(x)$ 은 도파로 1의 정규화된 선형 TE_0 모드이다. 앞에서 언급했듯이 두 도파로 사이의 간격은 선형 커플링이 일어나지 않을 만큼 충분히 떨어져 있어야 한다. 따라서 본 수치 해석에서는 이러한 조건을 충족하도록 $D = 5 \mu\text{m}$, $d = 3 \mu\text{m}$ 로

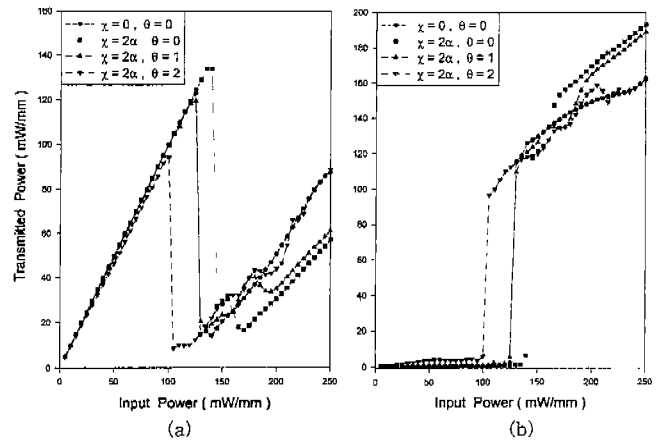


그림 2. 기존의 솔리톤 결합기($\chi=0, \theta=0^\circ$)와 비선형성의 포화 패러미터, χ 가 2α 이고, 굽은 각도가 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ 인 굽은형 솔리톤 결합기의 입력 파워에 따른 (a) 도파로 1, (b) 도파로 2 쪽으로 전송되는 파워의 변화. 총 진행 거리는 1 mm.

고정하여 사용하였다. 또한 굽은 부분의 길이는 솔리톤 방출이 일어나는 최소 진행 거리보다 충분히 짧게 선택하여야 하는 조건에 맞추어 $l = 80 \mu\text{m}$ 로 선택하였다. 그리고 본 논문의 수치 해석에서는 굽은 각도가 최대 2° 인 경우에 대해서 시뮬레이션을 실행하였다. 한편, 포화 패러미터는 $\chi < 32\alpha$ 의 관계식을 만족시켜야 한다. 그러나 포화 패러미터 값이 증가함에 따라 솔리톤 방출이 일어나는 입력파의 문턱값 또한 폭발적으로 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 수치 해석상의 편의를 도모하기 위해 상대적으로 낮은 범위의 포화 패러미터를 사용하였으며, 그 값은 2α 이다.

그림 2는 기존의 솔리톤 결합기 즉, 포화 패러미터 χ 가 0° 이고, 굽은 각도 θ 가 0° 인 경우와 포화 패러미터 χ 가 2α 이고, 굽은 각도가 각각 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ 인 포화 비선형성을 갖는 굽은형 솔리톤 결합기에 대해, 도파로 1에 입사되는 입력파의 파워를 0~250 mW/mm의 범위로 변화시켜 가면서 각 도파로 쪽으로의 파워 전달 특성을 비교해 본 것이다. 이때 각 입력파의 총 진행 거리는 1 mm로 고정하였으며, 그 거리가 짧기 때문에 결합기 내에서의 파워 손실은 일단 무시하였다. 각각의 경우에 대해 그림 2(a)는 입사된 파가 도파로 1을 따라 전달된 파워의 양을, 그림 2(b)는 입사된 파가 솔리톤 방출을 일으킨 후 도파로 2 쪽으로 전달되어 포획된 파워의 양을 나타낸다. 여기에서 각각의 도파로 쪽으로 전달된 파워의 양은 수치 해석상의 편의를 도모하기 위해 그림 1의 0점을 중심으로 좌측(도파로 1이 존재하는 방향)으로 전달되는 진행파의 파워의 총량을 도파로 1을 통해 전달된 파워로, 그리고 0점을 중심으로 우측(도파로 2가 존재하는 방향)으로 전달되는 진행파의 파워의 총량을 도파로 2를 통해 전달된 파워로 가정하여 각각 계산하였다. 그림 2에서 알 수 있듯이 비선형성의 포화 효과를 고려($\chi = 2\alpha$)한 경우, 그렇지 않은 기존의 솔리톤 결합기와 비교해 보면, 솔리톤 방출을 위해 더 큰 문턱값이 필요하다. 반면에 문턱값 이상의 입력 파워에 대해 도파로 2 쪽으로 전송되는 파워의 전송 효율은 대체로 증가한다. 여기서 전송 효율은 솔리톤 방출의 문턱값 이상의 파워를 갖는 입

표 1. 비선형성의 포화 효과에 따른 굽은형 솔리톤 결합기의 특성 변화 비교.

특성	비선형성의 포화 효과를 고려하지 않은 경우 ($\chi = 0$)		비선형성의 포화 효과를 고려한 경우 ($\chi = 2\alpha$)	
	문턱값 (mW/mm)	입력이 200 mW/mm 일 때, 파워 전송율 (%)	문턱값 (mW/mm)	입력이 200 mW/mm 일 때, 파워 전송율 (%)
굽은 각도				
$\theta = 0^\circ$	126	74.61	141	84.70
$\theta = 1^\circ$	116	73.97	126	82.42
$\theta = 2^\circ$	95	63.54	101	77.96

력이 도파로 1에 입사될 때, 입력 파워에 대한 도파로 2쪽으로 전송되는 파워의 비를 의미한다. 한편 굽은 구조의 굽은 각도를 증가시키에 따라 솔리톤 방출에 대한 문턱값은 감소하지만 역으로 전송 효율 또한 감소한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 비선형성의 포화 패러미터, χ 가 2α 인 경우, 기존의 솔리톤 결합기($\theta = 0^\circ, \chi = 0$)보다 커진 문턱값 파워의 양은 단지 1° 의 굽은 구조를 적용시킴으로써 보상할 수 있으며, 2° 의 굽은 구조를 적용시킴으로써 기존의 솔리톤 결합기보다도 더 낮은 문턱값을 얻을 수 있다. 그러나 이 경우, 포화 효과를 고려함으로써 증가하였던 전송 효율이 기존의 솔리톤 결합기 수준으로 감소한다. 이러한 비선형성의 포화 효과에 따른 굽은형 솔리톤 결합기의 특성값들의 변화는 표 1과 같다.

그림 3과 4는 다양한 조건을 갖는 굽은형 솔리톤 결합기에 입사된 여러 가지 입사파를 $600 \mu\text{m}$ 씩 진행시켜 가면서 그 진행 모습의 변화를 살펴본 것이다. 그림 3(a)는 굽은 각도가 0° 이고, 포화 패러미터 값이 0인 기존의 솔리톤 결합기에 입력 파워가 130 mW/mm 인 파를 진행시킨 결과로, 그 입력 파워가 솔리톤 방출의 문턱값보다 크기 때문에 도파로 2쪽으로의 솔리톤 방출이 일어나고, 이 솔리톤 파는 도파로 2에서 대부분 포획된다. 그림 3(b)는 그림 3(a)의 조건에서 포화 패러미터 값만 2α 로 바꾼 경우로, 입력된 파는 비선형 매질의 영향을 받아 공통 클래딩부 쪽으로 약간의 쓸림이 있지만, 그 입력 파워가 비선형성의 포화 효과로 인해 증가된 문턱값보다 작기 때문에 솔리톤 방출이 일어나지 못하여 다시 도파로 1쪽으로 되돌아가게 되고, 이러한 현상이 반복되어 결국에는 도파로 1 근처에서 구불구불하게 진행하는 모습을 보인다.¹¹⁸⁾ 그림 3(c)는 그림 3(b)의 조건에서 굽은 각도를 1° 로 바꾼 경우로, 이때의 입력 파워는 굽은 구조의 적용으로 인해 다시 줄어든 솔리톤 방출의 문턱값보다 크기 때문에 그림 3(a)처럼 솔리톤 방출과 도파로 2에서의 포획이 일어난다. 그림 4(a)는 그림 3(a)에서의 기존의 솔리톤 결합기에 입력 파워가 110 mW/mm 인 파를 진행시킨 결과로, 그 입력 파워가 솔리톤 방출의 문턱값보다 작기 때문에 솔리톤 방출은 일어나지 않고 그림 3(b)와 같은 구불구불한 진행 모습을 보인다. 그림 4(b)는 그림 3(c)의 조건에서 입력 파워만 그림 4(a)처럼 110 mW/mm 로 낮춘 경우로, 그림 3(c)와는 달리 입력 파워의 크기가 솔리톤 방출의 문턱값보다 작아서 그림 4(a)와 마찬가지로 구불구불한 진행 모습을 보인다. 그림 4(c)는 그림 4(b)의 조건에서 굽은 각도를 2° 로 바꾼 경우로, 이 경우에는 솔리톤 방출의 문턱값이 입력 파워인 110 mW/mm 보다 작아지게 되고, 이로 인해 솔리톤 방출과 도파로 2에서의 포획이 일어나게 된다. 즉, 굽은 각도를 1° 에서 2° 로 더욱 증가시키에 따라 비선형성의 포화 효

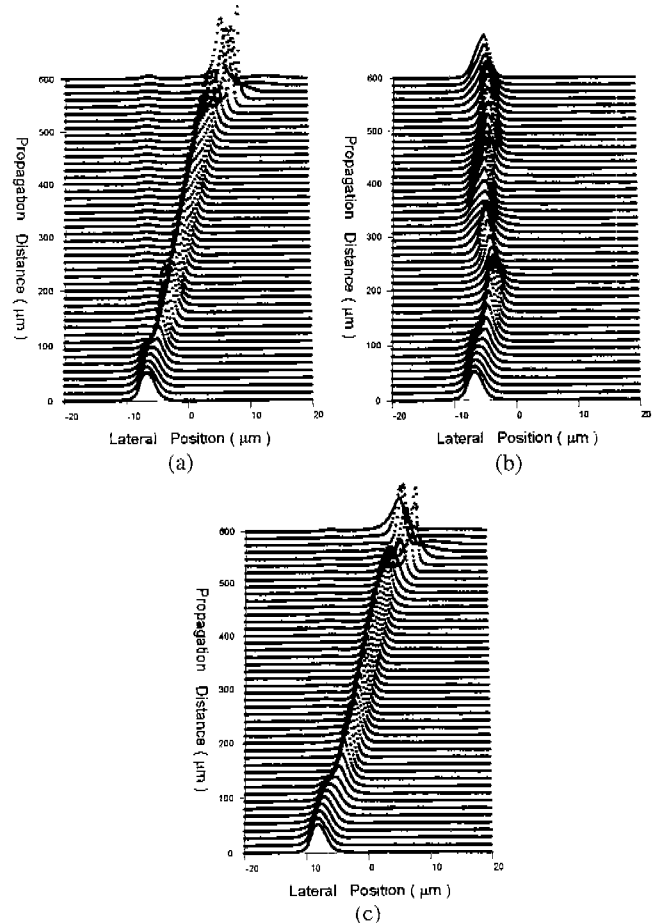


그림 3. 다양한 조건을 갖는 굽은형 솔리톤 결합기에 입사된 입력 파($P_{in} = 130 \text{ mW/mm}$)의 진행 모습. 총 진행 거리는 $600 \mu\text{m}$. (a) $\theta = 0^\circ, \chi = 0$, (b) $\theta = 0^\circ, \chi = 2\alpha$, (c) $\theta = 1^\circ, \chi = 2\alpha$.

과 고려에 의한 문턱값 증가를 보상하는데 그치지 않고, 그 이상의 문턱값 감소 효과를 얻을 수 있게 된다. 그러나 앞서서도 언급했듯이 굽은 각도의 증가는 전송 효율의 감소 및 파워 손실을 유발시킬 수 있으므로, 그 값을 무한히 키울 수 없으며, 신중히 결정하여야 한다.

한편 지금까지의 수치 해석은 그 진행 거리가 짧다는 이유로 솔리톤 결합기 내에서의 파워 손실을 무시하였다. 그러나 이와 같은 Kerr-type 매질에서의 굴절률은 그 진행파의 세기와 밀접한 관계가 있기 때문에 결합기 내에서의 파워 손실이 존재한다면 그 영향을 결코 무시할 수 없으며, 수치 해석상의 결과에도 큰 영향을 미칠 것이다. 이에 본 논문에서는 짧은

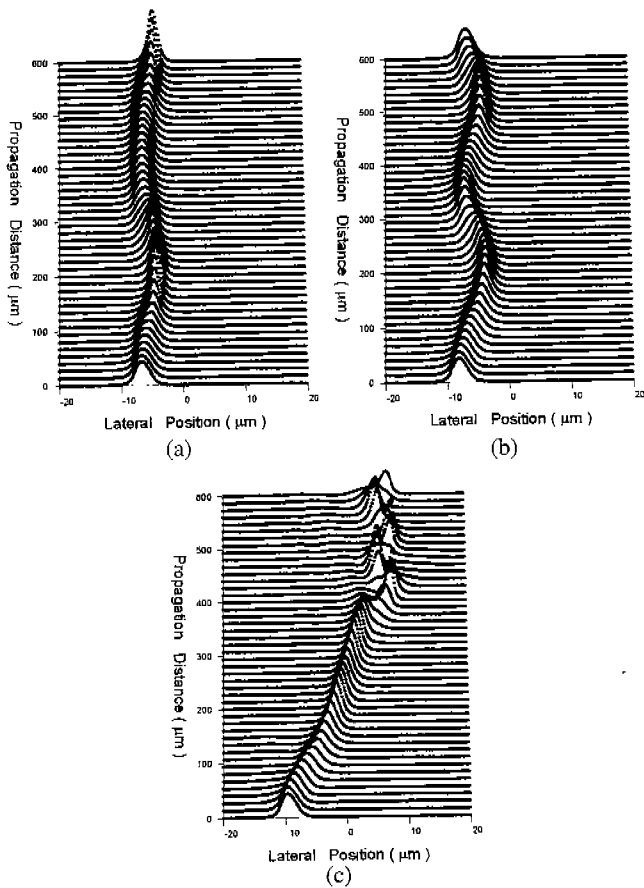


그림 4. 다양한 조건을 갖는 굽은형 솔리톤 결합기에 입사된 입력파($P_{in} = 110 \text{ mW/mm}$)의 진행 모습. 총 진행 거리는 $600 \mu\text{m}$. (a) $\theta = 0^\circ$, $\chi = 0$, (b) $\theta = 1^\circ$, $\chi = 2\alpha$, (c) $\theta = 2^\circ$, $\chi = 2\alpha$.

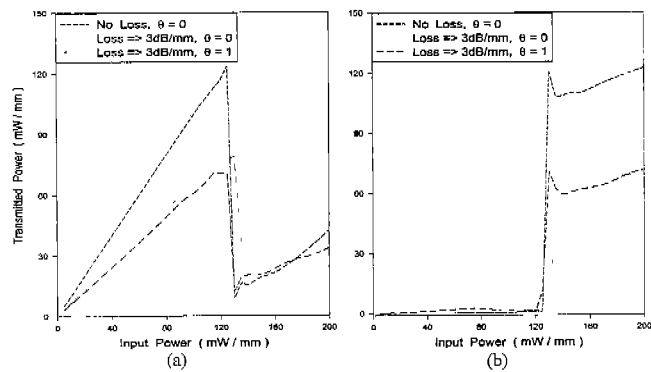


그림 5. 손실이 없는 기존의 솔리톤 결합기($\theta = 0^\circ$)와 굽은 각도가 0° , 1° 이고, 매질에서의 손실이 3 dB/mm 인 굽은형 솔리톤 결합기의 입력 파워에 따른 (a) 도파로 1, (b) 도파로 2 쪽으로 전송되는 파워의 변화. 비선형성의 포화 효과는 고려하지 않았으며, 총 진행 거리는 $600 \mu\text{m}$.

진행 거리에도 불구하고 결합기 구조 내에서의 파의 진행에 따른 파워 손실을 무시할 수 없는 경우에 대해 그 수치 해석을 실행하였다.

그림 5와 그림 6은 결합기 구조 내에서의 파의 진행에 따른

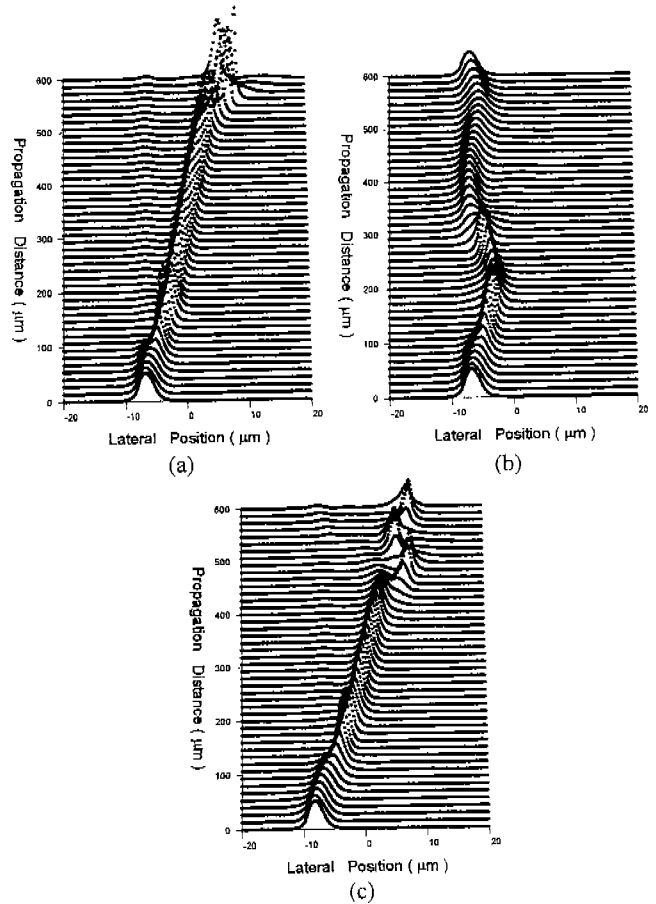


그림 6. 손실이 있는 굽은형 솔리톤 결합기에 입사된 입력파($P_{in} = 130 \text{ mW/mm}$)의 진행 모습으로 비선형성의 포화 효과는 고려하지 않았으며, 총 진행 거리는 $600 \mu\text{m}$. (a) $\theta = 0^\circ$, loss = 0 dB/mm , (b) $\theta = 0^\circ$, loss = 3 dB/mm , (c) $\theta = 1^\circ$, loss = 3 dB/mm .

파워 손실을 고려한 결과이다. 파의 진행에 따른 파워 손실의 값이 0과 3 dB/mm 인 경우를 비교한 것으로, 파워 손실의 영향만 알아보기 위해 매질에서의 비선형성의 포화 효과는 고려하지 않았다. 또한 결합기를 구성하는 모든 매질에서의 손실 정도가 동일하다고 가정하였다.

그림 5는 손실이 없고 굽은 각도 θ 가 0° 인 기존의 솔리톤 결합기와 파의 진행에 따른 파워 손실의 값이 3 dB/mm 이고, 굽은 각도 θ 가 0° 와 1° 인 굽은형 솔리톤 결합기에 대해, 도파로 1에 입사되는 입력파의 파워를 $0 \sim 200 \text{ mW/mm}$ 의 범위로 변화시켜 가면서 각 도파로 쪽으로의 파워 전달 특성을 비교해 본 것이다. 이때 각 입력파의 총 진행 거리는 $600 \mu\text{m}$ 로 하였다. 그림 5(a)는 입사된 파가 도파로 1 쪽으로, 그림 5(b)는 입사된 파가 솔리톤 방출을 일으킨 후 도파로 2 쪽으로 전달되어 포획된 파워의 양을 나타낸다. 그림 5를 통해 알 수 있듯이 파워 손실이 없는 기존의 솔리톤 결합기에 비해 3 dB/mm 의 손실이 있는 경우에는 그 문턱값이 증가하지만, 이 결합기에 굽은 구조($\theta = 1^\circ$)를 적용시킴으로써 그 문턱값을 원래의 수준으로 낮출 수 있다.

그림 6은 그림 5의 각 경우에 대해 파워가 130 mW/mm 인

입력파를 600 μm 씩 진행시켜 가며 그 진행 모습의 변화를 살펴본 것이다. 그림 6(a)는 굽은 각도가 0°이고, 파워 손실이 없을 때의 결과로, 이때에는 주어진 입력 파워가 솔리톤 방출의 문턱값보다 크기 때문에 도파로 2쪽으로의 솔리톤 방출이 일어난다. 그림 6(b)는 그림 6(a)의 경우에 3 dB/mm의 파워 손실을 적용시킨 경우로, 진행 초기에는 비선형성의 영향으로 솔리톤 방출이 일어날 듯 공통 클래딩부 쪽으로의 솔리톤이 있지만, 곧 파워 손실에 의해 진행파의 보유 파워가 줄어들어 솔리톤 방출을 일으키지 못하고 도파로 1쪽으로 되돌아온 후 도파로 1을 따라 진행하게 된다. 그림 6(c)는 그림 6(b)의 경우에 굽은 각도를 1°만큼 적용시킨 것으로, 그림 6(a)처럼 솔리톤 방출이 일어나고 있다. 이는 굽은 구조의 적용을 통해 파워 손실을 보상할 수 있음을 보여주는 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 굽은 비선형 도파로를 이용한 솔리톤 결합기의 동작 특성을 알아보았다. 굽은 각도가 각각 0°, 1°, 2°인 굽은형 솔리톤 결합기에 대해, 도파로 1에 입사되는 입력파의 파워를 0~250 mW/mm의 범위로 변화시켜 가면서 각 도파로 쪽으로의 파워 전달 특성을 비교해 보았다. 이를 통해 굽은형 솔리톤 결합기의 굽은 각도가 커질수록 더 낮은 문턱값을 갖는다는 사실을 알게 되었다. 그러나 이처럼 결합기의 굽은 각도가 커지면 솔리톤 방출에 의해 도파로 2에 입사되는 솔리톤 파의 입사 각도 또한 점점 커지게 되고, 이에 따라 도파로 2의 경계면에서 발생하는 반사파의 양 또한 증가하여 솔리톤에 의한 스위칭 전송 효율이 떨어지게 됨을 알 수 있었다. 따라서 굽은형 솔리톤 결합기의 굽은 각도는 신중히 결정되어야만 한다. 한편, 굽은형 솔리톤 결합기를 통한 파의 전송을 보다 정확하고 실제적으로 수치 해석하기 위해 비선형성의 포화 효과와 매질에서의 손실을 고려하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 이러한 조건 아래에서는 솔리톤 방출의 문턱값으로 더 큰 입력 파워가 요구되며, 굽은 구조를 적용시킴으로써 이와 같은 문턱값의 증가를 보상할 수 있음을 알았다. 따라서 본 논문에서 제시한 굽은형 솔리톤 결합기는, 더 낮은 입력 파워를 솔리톤 방출의 문턱값으로 갖는, 낮은 문턱값 소자(lower-threshold device)로 활용될 수 있을 것이다. 즉, 실제의 경우, 비선형성의 포화 효과와 손실이 있는 비선형 도파로를 이용하여 솔리톤을 발생시키기 위해서는 높은 문턱값 이상의 입력 파워가 필요하게 되지만, 굽은 구조의 비선형 도파로를 채택함으

로써 낮은 입력 파워에서 솔리톤을 발생시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 초고속 광네트워크 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] C. T. Seaton, J. D. Valera, R. L. Shoemaker, G. I. Stegeman, J. T. Chilwell, and S. D. Smith, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-21**, 774 (1985).
- [2] F. Farjady, M. G. F. Wilson, and P. M. Radmore, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 1047 (1996).
- [3] M. Shalaby and A. Barthelemy, *Opt. Lett.* **16**, 1472 (1991).
- [4] L. Lefort and A. Barthelemy, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9**, 1364 (1997).
- [5] D. R. Heatley, E. M. Wright, and G. I. Stegeman, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 172 (1988).
- [6] K. Ogusu, *Opt. Lett.* **16**, 312 (1991).
- [7] W. C. Chang, S. F. Liu, and W. S. Wang, *Electron. Lett.* **27**, 2190 (1991).
- [8] C. K. Kim, J. M. Jeong, and H. S. Chang, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, 832 (1998).
- [9] P. L. Fan, M. L. Wu, and C. T. Lee, *J. Lightwave Technol.* **15**, 1026 (1997).
- [10] S. Gatz and J. Herrmann, *J. Opt. Soc. Am. B* **8**, 2296 (1991).
- [11] P. A. Buah, B. M. A. Rahman, and K. T. V. Grattan, *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 874 (1997).
- [12] Y. Chung and N. Dagli, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-26**, 1335 (1990).
- [13] G. R. Hardley, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-28**, 363 (1992).
- [14] M. A. Gubbels, E. M. Wright, G. I. Stegeman, C. T. Seaton, and J. V. Moloney, *J. Opt. Soc. Am. B* **4**, 1837 (1987).
- [15] W. J. Tomlinson, J. P. Gordon, P. W. Smith, and A. E. Kaplan, *Appl. Opt.* **21**, 2041 (1982).
- [16] A. Aceves, J. V. Moloney, and A. C. Newell, *J. Opt. Soc. Am. B* **5**, 559 (1988).
- [17] H. Y. Liu and W. S. Wang, *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.* **5**, 42 (1995).
- [18] T. Rozzi and L. Zappelli, *J. Lightwave Technol.* **14**, 229 (1996).

Soliton coupler using a bent nonlinear waveguide

Jun-Young Jeong, Byung-Han Kang and Je-Myung Jeong

Department of Radio Science and Engineering, Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

(Received August 6, 1999, Revised manuscript received November 18, 1999)

In this paper, we studied the characteristics of a soliton coupler using a bent nonlinear waveguide. The bent soliton coupler has very sharp switching characteristic like the conventional soliton coupler due to the threshold effect of soliton emission from the nonlinear waveguide. By using the bent structure, we can reduce the threshold power for the soliton emission. We consider the saturation effect of nonlinearity and the loss in the medium for more accurate and practical numerical analysis in wave propagation through the bent soliton coupler. The simulation results show that the consideration of the saturation effect and the loss may be very important in the analyses and design of the nonlinear waveguide devices. The bent structure is useful for the emission of the spatial soliton with the low threshold power, when we consider the saturation and the loss effect.