

論文96-33A-7-2

광 솔리톤 전송 시스템에 있어서 최대치 추적에 의한 상호 작용력 분석

(Interaction Force Analysis by Peak Value Tracking in Optical Soliton Transmission System)

邊承宇*, 宋在元**

(Seung Woo Byun and Jae Won Song)

요 약

장거리 대용량의 데이터 전송 시스템을 위해 사용되고 있는 비선형/분산 광전송로의 솔리톤 전송 시스템은 손실 특성과 상호 작용력에 의한 전송 속도의 제한 특성이 중요한 문제이다. 본 논문에서는 무손실의 경우, 상호 작용력의 영향 정도를 분석하기 위해 인접솔리톤의 상호 작용력으로 인한 최대치 시간 이동의 원인을 설명하고 최대치 추적 방법에 의해 상호 작용력에 의한 오차 백분율을 유도, 정의하여 최적의 전송 속도를 유지하기 위한 인접솔리톤의 시간 간격을 제시하고자 하였다. 그 결과 기본 솔리톤의 경우 인접 솔리톤의 시간 간격 값을 솔리톤 펄스폭의 5배로 하였을 때 초기 오차 백분율은 0.5%이었으며, 최대 허용 오차 백분율을 50%로 하였을 경우 솔리톤 최대 전송 가능거리는 솔리톤 주기 거리의 38배로 확인되었다.

Abstract

In the soliton transmission system for a long-length and high bit rate data transmission system using the nonlinear / dispersive optical fibers, the important problem is the loss characteristics and is the limited transmission rate by interaction forces. In this paper, It is explained the reasons of moved time position for the soliton peak value due to interaction forces of adjacent solitons. And for the analysis of interaction force affection level in the lossless media, we define the percent parameter of error rate due to the interaction forces and propose the optimum time distance of adjacent solitons by peak value tracking methods. With the results, initial percent of error is approximately 50% when time difference between adjacent solitons is 5 times of fundamental soliton pulse width. And it is confirmed that maximum transmission length of the solitons is approximately 38 times of fundamental soliton period, which the maximum allowable percent of error is 50%.

I. 서 론

대용량의 장거리 광통신 시스템을 실현하기 위한 전송로로서 저 손실 비선형 분산 특성을 갖는 광섬유를

이용한 광솔리톤 전송 시스템에 대한 관심이 최근 많이 보여지고 있다^[1]. 시분할 다중화 방식의 고속 정보 통신의 목적을 이루기 위한 광솔리톤 전송 기술의 이론적인 내용과 실험적인 가능성이 제시됨으로써 조만간에 이의 실용화가 눈앞에 다가오고 있는 추세이다. 광통신 시스템의 펄스 전송 시스템에 있어서 가장 문제가 되는 현상은 전송로의 손실 특성과 분산 특성이다^[2,3]. 손실 특성은 장거리의 펄스 전송시 에너지를 잃어버리는 현상으로 이를 극복하기 위해 저 손실의 광섬유와 함께 최저의 손실 특성을 갖도록 적절한 광

* 正會員, 蓮庵工業專門大學 電子科
(Dept. of Electronics, Yonam College of Eng.)

** 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部
(Dept. of Electronics, Kyungpook Nat'l Univ.)

接受日字: 1995年4月14日, 수정완료일: 1996年5月13日

캐리어 파장의 선택과 적정 간격의 광증폭기를 설치함으로써 전송 펄스의 에너지 유실 현상을 피할 수 있다. 그러나 분산 특성은 광펄스의 장거리 전송시 신호 자체를 왜곡시켜 전송 가능 거리를 극히 제한하게 되는 특성을 가지고 있으므로 신호의 모드 분산 특성을 보완하기 위해 단일 모드의 광섬유를 사용할 수 있지만 광섬유 자체의 특성에 의한 재료 분산 특성은 특별한 이론과 기술을 사용하지 않으면 보완할 수가 없다. 이와 같은 광섬유의 재료 분산 특성을 광섬유가 가지고 있는 비선형특성을 이용하여 분산에 의한 펄스 폭의 확산을 반대 방향으로 보상함으로써 결과적으로 펄스 폭의 확산 없이 장거리로 전송할 수 있는 광전송 시스템이 솔리톤 전송 시스템이다. 이와 같은 광솔리톤 시스템은 처음 1973년 Hasegawa와 Tappert에 의해 이론적인 개념이 전개되고^[4] 그 이후 고성능의 레이저가 개발되어 여러 가지 관련 이론과 실험이 수행되어 왔다^[5,6,7]. 그러나 솔리톤 전송 기술에 있어 가장 큰 문제점은 광섬유의 손실에 의한 솔리톤의 고유 특성의 유실과 비선형 전송 특성으로 인한 근접한 인접 솔리톤간의 상호 작용력(interaction force)이며 광섬유 자체의 손실에 의한 솔리톤 고유 특성의 유실 방지를 위해 최근에 저 전력 용도의 에르븀(Erbium)이온을 도핑(doping)한 광섬유 증폭기가 개발되어 어느 정도의 손실 보상이 가능한 광솔리톤 장거리 전송 시스템을 구성할 수 있게 되었다. 그러나 전송 속도를 개선시키기 위해 전송 솔리톤간의 간격이 근접하게 되면 비선형특성으로 인한 인접 솔리톤 상호간의 상호 작용력이 발생되어 전송 비트에러율이 증가하게 된다^[8,9].

본 논문에서는 이와 같이 근접한 인접 솔리톤간의 상호 작용력을 분석하기 위해 단일 광솔리톤 전송 이론과 상호 작용력의 원인을 간략하게 소개하고, 솔리톤 비트의 전송 속도를 향상시키기 위해 인접하는 솔리톤 펄스간의 시간 간격값을 더욱더 근접시키면 더 큰 상호 작용력의 발생에 의해 고유 특성을 잃어버리게 된다. 이와 같은 현상을 정량적으로 분석하기 위해 최대치 추적에 의한 오차 백분율을 유도하여 솔리톤 비트의 전송거리에 따른 최대 가능 거리를 수치 해석에 의해 연구 결과를 확인하고자 한다.

II. 광솔리톤 전송 이론 및 상호 작용력

광솔리톤 전송 시스템은 전송 매질이 저 손실의 분

산 특성을 갖는 비선형특성의 단일 모드 광섬유를 이용할 때 적용할 수 있는 방식이다. 광섬유의 비선형특성은 매질의 분극 밀도가 외부에 인가되는 전계의 세기에 대해 비선형이 되는 특성을 가질 때 존재하게 된다. 그러면 전송되는 입사 광의 세기(intensity)에 따라 굴절률이 변화되는 광 Kerr 효과(optical Kerr effect)^[10] 와 자기 위상 변조(self phase modulation)^[11] 에 의해 광 포락선 u 가 광캐리어에 비해 상대적으로 서서히 변화한다면 즉, 전송되는 광에 포함된 파장 성분의 폭이 매우 적다면 비선형 특성에 의한 변화와 분산 특성에 의한 전파 특성의 변화를 고려한 무손실 경우의 일반적인 관계식은 비선형 Schrödinger방정식으로 주어지며 식 (1)과 같다^[10].

$$i(k \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{1}{2} k'' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + k_2 |u|^2 u = 0 \quad (1)$$

식(1)에서 보면 좌항의 3번째 항은 분산 특성을 표현하고 있으며 4번째 항은 비선형특성을 표현하고 있다. 그리고 비선형 굴절률 값이 양수일 때 비선형특성에 의한 전파 특성의 변화와 분산 특성에 의한 전파 특성의 변화가 서로 보상하기 위한 모습을 보이기 위해서는 k'' 가 음수이어야 한다. 그러면 전송 광이 분산 없이 전송되어 솔리톤의 형태로 장거리 전송 목적을 달성할 수 있으며 이와 같은 동작이 되기 위해서는 일반적인 광 유리섬유에서 광캐리어의 파장이 1.3 μ m 이상이어야 한다. 그리고 k'' 가 음수인 영역을 변이분산(anomalous dispersion) 영역이라 하며 이와 같은 조건을 만족하는 일반적인 형태의 단일 광솔리톤 포락선 u_s 의 형태는 식(1)의 해로서 다음의 식(2)와 같이 주어진다^[12].

$$u_s = A \operatorname{sech}(At - q) \exp(-i\Omega t + i\Phi) \quad (2)$$

여기서 A 는 전송 광의 피크 진폭과 솔리톤 피크 진폭과의 비, t 는 전송 광의 시간과 솔리톤 펄스 폭과의 시간 비를 나타내는 무차원(dimensionless)의 값이며 q 는 전송 거리 z 만큼 전송되는데 걸리는 시간 즉, $q = q_0 - A\Omega z$ 이며 Φ 는 z 만큼 전송 후의 발생되는 위상차 즉, $\Phi = \Phi_0 - (A^2 - \Omega^2)z/2$ 로 주어진다. 단일 광 솔리톤을 표현하고 있는 식 (1)에서 실제의 초기치($z=0, q_0=0, \Phi_0=0$) 및 광 캐리어 주파수 $\omega = \omega_0$ 에서 생각해 보면 분산 계수 k'' , 그룹 속도 $v_g = 1/k'$ 로 주어지는 초기 솔리톤의 포락선 u_0 은 식 (3)와 같

이 주어지며 진폭비 A 를 1이라 할 때 즉, 전송 광의 펄스 진폭이 솔리톤 진폭과 동일하다면 기본 솔리톤의 포락선은 그림 1과 같은 형태가 된다. 그리고 광전송로의 분산 계수와 비선형계수가 정해지면 솔리톤의 피크 전력은 펄스 폭의 제곱에 반비례하는 관계를 가지며 서로 종속적인 관계를 가진다.

$$u_0 = A \operatorname{sech}(A t) \quad (3)$$

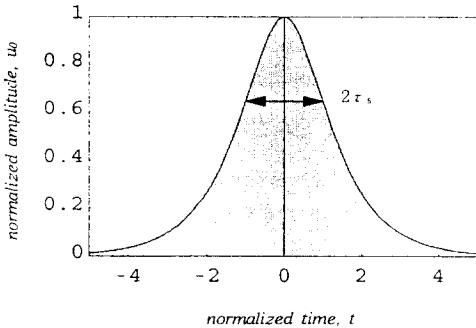


그림 1. 초기 기본 솔리톤 포락선의 형태(A=1)
Fig. 1. Envelope of initial fundamental soliton (A=1).

즉, 식 (3)에서와 같이 진폭비 A 가 커지면 펄스 폭은 감소하며 광섬유의 고유 특성이 정해지면 고유 상수로 생각할 수 있는 값이다. 또한 광솔리톤이 전송되는 형태는 광캐리어가 초기 포락선 u_0 에 진폭 변조되는 신호 형태를 가지며 그룹 속도 v_g 로 z 방향으로 전송되면서 비선형특성에 의한 위상 전이가 분산 특성에 의한 그룹 속도 변화에 의해 완벽하게 보상되면서 포락선의 분산 없이 장거리로 전송되는 모양을 가지고 있다. 그러나 광섬유의 손실 특성을 고려한다면 임의의 거리 전송후 솔리톤의 고유 전송 특성을 잃어버리기 때문에 솔리톤의 주기(period)보다 짧은 거리 이내에서 증폭기가 설치되어야 솔리톤 특성이 유지될 수 있다. 그리고 장거리 전송시 이와 같은 증폭기가 다수 주기적인 간격으로 설치되므로 증폭기에서 발생하는 진폭 잡음(ASE noise)과 비선형 잡음으로 인해 타이밍 지터(timing jitter)현상이 생기게 된다. 이로 인한 비트 에러율 증가 현상을 Gordon-Haus효과라고 부르며 이 현상을 감소시키기 위해 보통 광필터나 광 변조기를 사용한다. 그러므로 이와 같은 보완이 이뤄져 솔리톤이 전송되고 있다면 전송 광펄스는 분산 없이 전송될 수 있으므로 장거리의 데이터전송 통신 목적을 달성할 수

있다.

그러나 Gordon-Haus 효과를 만족하는 범위 내에서 특정 전송 거리의 시스템 전송 속도를 개선시키는 경우, 근접한 인접 솔리톤간의 펄스 시간 간격이 좁아지게 되어 근접한 인접솔리톤 상호간의 상호 작용력에 의해 솔리톤으로서의 특성이 유실되어 장거리 전송시 비트 에러율이 크게 증대하게 된다. 먼저 이론적으로 무손실의 경우, 광솔리톤이 z 방향으로 정체적으로 전송된다고 보면, 그리고 시간과 포락선의 상관관계만을 파악하기 위해 그룹 속도 $k' = 0$ 및 단위 계수로 $k_2 = 1$ 및 $k'' = -1$ 이라고 가정하면 포락선 u 는 식 (1)의 일반적인 비선형 Schrödinger방정식으로부터 식 (4)와 같이 생각할 수 있다.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + f(u) = 0 \quad (4)$$

여기서 $f(u) = |u|^2 u$ 로 주어지며 u 가 실수로서 항상 0 이상이라고 하면 $f(u) = u^3$ 로 주어진다. 근접된 인접솔리톤의 포락선 u 가 (4)식을 만족하는 해로 주어지는 u_+ 부분과 u_- 부분으로 중복된다면 즉 $u = u_+ + u_-$ 으로 표현된다면 $f(u) \neq f(u_+) + f(u_-)$ 이기 때문에 비선형 시스템으로 생각하여야 하며 중복 포락선 u 가 0 이 아닐 때 즉, $u = u_+ + u_- \neq 0$ 일 때 $f(u) = f(u_+) + f(u_-)$ 와 같이되어 선형 시스템이 되기 위해서는 $u_+ \cdot u_-$ 곱이 0 가 되어야 한다. 그러면 (4)식의 해로 주어지는 u_+ 부분과 u_- 부분은 서로 선형 관계로 생각할 수 있으므로 서로 상호관계가 전혀 없는 것으로 생각할 수 있다. 그리고 u_+ 와 u_- 가 각각 (4)식의 해로 주어지는 벡터 영역의 값이라고 하면 $u_+ \cdot u_- = 0$ 의 조건은 두개의 벡터가 직교 관계(orthogonal)의 함수로 주어지는 조건을 말한다. 그러므로 u_+ 와 u_- 의 평균값(mean value)이 무한 영역에서 0 라고 할 때 $u_+ \cdot u_- = 0$ 의 조건은 非상관관계(uncorrelated)의 조건을 뜻한다. 그러므로 근접한 인접 솔리톤간에 비선형적인 관계가 되어 상호관계를 고려할 것인지 선형적인 관계로 독립적인 관계로 생각할 것인지는 두 솔리톤간에 자기 공분산 계수(auto-covariance coefficient)를 구해 보면 알 수 있을 것이다.

III. 인접 솔리톤간 최대치 추적

앞절에서 설명된 바와 같이 근접한 인접 솔리톤간의

상호 작용력을 무시할 수 있기 위해서는 인접 솔리톤 간의 시간 간격이 무한히 크게 할 수밖에 없다. 그러나 현실적으로 시스템의 전송 속도와 두 솔리톤간의 시간 간격은 서로 반비례하는 관계를 가지고 있으므로 최소한의 시간 간격을 유지시켜 최적의 전송 속도를 갖는 시스템이 제시되어야 한다. 이를 위해 본 절에서 두 솔리톤간의 시간 간격에 따른 상호 작용력 분석을 위해 근접한 전송 광솔리톤들의 최대치가 존재하는 시간 위치를 추적, 분석함으로써 최적의 광솔리톤 전송 시스템을 제시하고자 한다. 이론적으로 그림 1의 단위 크기를 가진 이상적인 단일 솔리톤의 포락선에서 보면 비선형 특성에 의한 순시 주파수의 변화량 $\Delta\omega_n$ 이 0 가 되는 시간 위치에서 즉, 그림 1에서와 같이 $t=0$ 에서 피크치가 존재하며 또한 시간 축에 대한 전력의 미분 즉, 그림 1에서 전력의 시간 변화량 $\partial p_n / \partial t$ 의 최대치가 되는 시간 위치 $t=0$ 의 위치에서 피크치가 존재한다. 그러므로 근접한 인접 솔리톤에 의해 포락선이 변형되었을 경우 비선형특성에 의한 순시 주파수의 변화량 $\Delta\omega_n$ 이 0 가 되는 즉, 광캐리어의 주파수가 변하지 않는 시간 위치를 추적함으로써 혹은 전력의 시간 변화량 $\partial p_n / \partial t$ 의 최대치가 존재하는 시간 위치를 추적함으로써 상호 작용력으로 인한 솔리톤 중심 이동을 분석할 수 있다. 먼저 근접한 인접 두 솔리톤 u_+ 와 u_- 를 (3) 식으로 부터 각각 식 (5)와 같이 정의하면 다음과 같이된다.

$$u_+ = A \operatorname{sech}(A(t+T)) \quad (5)$$

$$u_- = A \operatorname{sech}(A(t-T))$$

여기서 (5)식의 u_+ 와 u_- 는 각각 무손실 경우의 일 반적인 식(1)의 비선형 Schrödinger방정식의 해로 주어지는 이상적인 단일 솔리톤이며 두 솔리톤의 간격은 $2T$ 로 주어진다. 그러나 근접한 두 솔리톤이 근접하게 되면 각각의 위상 관계에 따라 포락선이 동상의 경우는 (6a)식, 역상의 경우에는 (6b)식과 같이 변형된다.

$$u_i = |u_+ + u_-| \quad (6a)$$

$$u_o = |u_+ - u_-| \quad (6b)$$

식(6)과 같이 인접 솔리톤에 의해 포락선이 변형되었을 경우에 광 전송로의 비선형 특성으로 인한 순시 주파수의 변화량 $\Delta\omega_n$ 이 0 가 되는 조건을 동상과 역상의 경우 각각에 대해서 계산해 보면 다음의 조건 식

(7)을 만족하는 $t=t_0$ 에서 $\Delta\omega_n = 0$ 가 된다.

$$\operatorname{sech}(A(t_0 - T))\tanh(A(t_0 - T)) = \pm \operatorname{sech}(A(t_0 + T))\tanh(A(t_0 + T)) \quad \begin{cases} + \text{역상} \\ - \text{동상} \end{cases} \quad (7)$$

위의 조건 식(7)에서 $2AT = x$, $\exp(x) = p$ 로 대 치하고 $2At_0 = y$, $\exp(y) = q$ 로 대치하면 다음 식 (8)과 같이 $q=g(p)$ 함수를 구할 수 있다.

$$q = g(p) = \frac{(1 \pm 4p + p^2) + \sqrt{(1 \pm 4p + p^2)^2 - 4p^2}}{2p} \quad \begin{cases} + \text{역상} \\ - \text{동상} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $p = \exp(x)$ 와 $q = \exp(y)$ 를 대입한 후 양변을 $\ln[.]$ 취하면 $\ln[q] = 2At_0 = y$ 가되어 식 (9)와 같이 주어진다.

$$y = \ln[g(e^x)] \quad (9)$$

$$t_d = \frac{\ln[g(e^{AT_d})]}{A}$$

여기서 표현되고 있는 관계식 (9)식은 A 의 피크치 를 가지고 있는 이상적인 단일 솔리톤이 $2T(=T_d)$ 의 간격으로 근접할 경우에 인접 솔리톤의 위상 관계(동상 혹은 역상)에 따라 포락선이 변형되어 비선형 특성에 의한 순시 주파수 변화량 $\Delta\omega_n$ 이 0가 되는 포락선 최 대치(피크치)의 존재 위치 t_0 가 변경되는 관계식을 표현하고 있다. 그러면 변경 후의 두 솔리톤의 간격은 $2t_0(=t_d)$ 라고 할 수 있으며 만약 두 솔리톤의 간격 t_d 가 T_d 와 다른 값을 갖는 경우에는 인접 솔리톤의 영향으로 흡인력($t_d < T_d$) 혹은 반발력($t_d > T_d$)의 상호 작용력에 의해 변경된다고 볼 수 있다. 또한 $t_d = T_d$ 이면 인접 솔리톤에 의한 상호 작용력이 전혀 없는 이상적인 경우로 생각할 수 있으며, 식 (9)에 의해 솔리톤의 피크치 A 가 1인 기본 솔리톤 포락선의 경우에 대해 T_d 에 대한 t_d 의 그래프는 그림 2와 같이 주어진다.

그림 2에서 보면 알 수 있듯이 T_d 의 값이 큰 경우 보다 작은 경우가 즉, 더욱더 인접해 있는 경우가 상호 작용력으로 인한 영향이 더 큰 모습을 보여주고 있으며 특히 동상의 경우, 식 (9)에서 보면 $p = \exp(AT_d)$ 의 값에 따라 항상 허수(image)의 값을 가지는 영역의 임계 솔리톤 간격 T_c 값이 주어진다. 즉, 이 값보다 좁은 간격에서는 상호 작용력의 영향이 진동하는 모습을 갖게 될 것으로 예측되고 있으나 본 논문에서는 의미

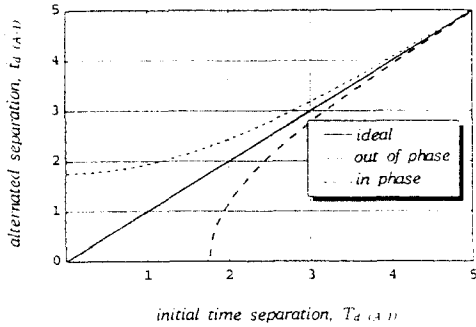
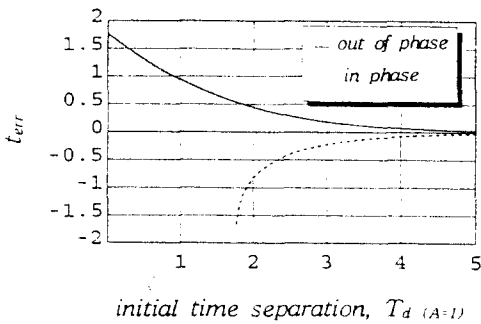
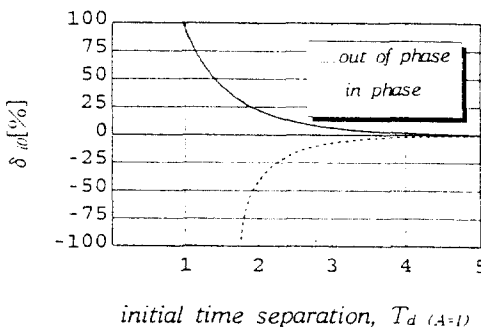


그림 2. 상호 작용력으로 인한 인접 광솔리톤의 펄스 시간 간격 변경 ($t_d : T_d$)
 Fig. 2. Changed pulse time separation of adjacent optical solitons due to interaction forces ($t_d : T_d$)



(a)



(b)

그림 3. (a) 상호 작용력으로 인한 오차 시간($t_d - T_d$)
 (b) 상호 작용력으로 인한 오차 백분율(δ_{io})
 Fig. 3. (a) Error time distance value ($t_d - T_d$) by the interaction forces. (b) Error percent (δ_{io}) by the interaction forces

있는 실수의 값을 가지는 경우로 한정해서 해석하도록 한다. 또한 인접 솔리톤의 상호 작용력 영향으로 솔리

톤 시간 간격이 변형되었을 경우, 이상적인 경우와의 오차 시간 t_{err} 즉, $t_d - T_d$ 를 (9)식으로 부터 계산하여 T_d 에 대한 t_{err} 의 그래프를 구해 보면 그림 3 (a) 와 같이되며 상호 작용력의 영향으로 인한 펄스 시간 간격의 오차 백분율 δ_{io} 을 (t_{err}/T_d) 100% 로 정의했을 때 T_d 에 대한 그래프는 그림 3 (b)와 같이된다.

그림 3의 결과는 인접 솔리톤의 퍼크치가 $A=1$ 인 기본 솔리톤으로 실제 실현 가능한 솔리톤 전력을 가진 시스템 경우의 결과이며, Mollenauer의 솔리톤 전송 실험^[9]에 의해 제안되고 있는 최소의 초기 인접 솔리톤의 시간 간격값인 T_d 의 값이 5이면 약 0.5%의 초기 오차 백분율을 가지는 것으로 파악되고 있다. 즉, 단위 크기를 가진 근접한 인접 솔리톤의 시간 간격을 솔리톤 펄스 폭의 5배로 유지하고 있으면 상호 작용력으로 인한 솔리톤 펄스간의 시간 간격 변경의 영향력이 처음에 약 0.5% 정도 된다는 것을 의미한다.

IV. 오차백분율 및 전송거리의 수치해석 결과

앞절에서 구해진 초기 인접 솔리톤의 최대치 추적에 의한 시간 간격치에 대한 분석 결과는 솔리톤이 장거리로 전송될 때 누적된 인접 솔리톤간의 상호 작용력으로 인해 시간 간격치가 변경되기 때문에 일정하게 유지되지 않는다. 그러므로 본절에서는 솔리톤이 장거리로 전송될 때 앞절에서 구한 초기 인접 솔리톤간의 오차 백분율 δ_{io} 의 값이 어떻게 유지되는가를 파악해 보고자 한다. 1987년 Decem 과 Chu 는 초기 인접 솔리톤의 시간 간격치가 솔리톤 펄스폭의 3배로 작은 펄스 간격에 대해서 솔리톤 전송 시스템의 증계기 거리를 나타내는 증폭 거리 L_a 가 솔리톤의 주기 L_s 보다 짧을때에 인접 솔리톤간의 진폭 변화가 거의 없다고 설명하고 있다^[13]. 그러므로 시스템의 조건이 $L_a < L_s$ 인 경우에는 선행 솔리톤과 후행 솔리톤간의 진폭차가 없으므로 무손실의 전송 시스템으로 생각할 수 있다. 그리고 Gordon 의 상호 작용력 방정식^[8]에 의하면 장거리로 솔리톤이 전송될 때 인접 솔리톤간의 초기 조건과 전송거리 z 에 따라 기본 솔리톤의 경우 다음 식 (10)와 같이 오차 백분율 δ_{iz} 의 값이 주어진다.

$$\delta_{iz} = \frac{100}{0.88T_d} \ln |f[\pi z e^{-0.88T_d}]| \quad (10)$$

식 (10)에서 함수 $f [\cdot]$ 는 인접 솔리톤간에 동상인 경우의 $\cos [\cdot]$ 함수로 변화가 심하게 이뤄지는 경우임을 알 수 있으며, 역상인 경우는 $\cosh [\cdot]$ 으로 단항적인 변화를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 위식에서 전송되는 솔리톤 펄스를 감지할 수 있는 범위에서의 최대 허용 오차 백분율은 50% 로 주어진다. 50% 이하의 영역과 그 이상의 영역을 구분하기 위해 인접 솔리톤의 위상관계가 동상인 경우 전송거리에 따른 오차 백분율의 그래프는 수치 해석에 의해 다음 그림 4와 같이 주어진다.

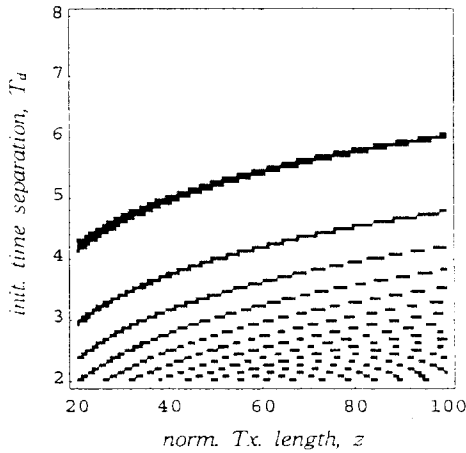
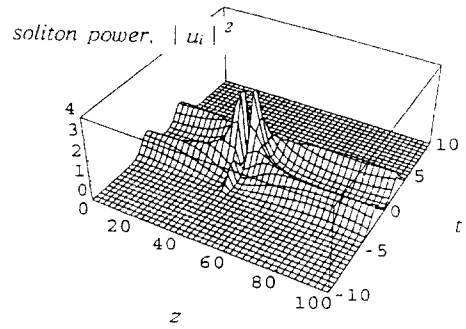


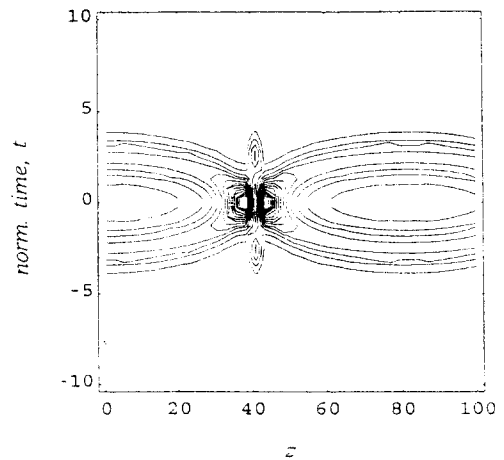
그림 4. 기본 솔리톤의 전송거리 z 에 따른 오차 백분율 $\delta_{iz} = 50\%$ 의 구분 그래프

Fig. 4. Distinguishing graph of $\delta_{iz} = 50\%$ in fundamental soliton transmission length z .

그림 4에서 전송거리 z 는 기본 솔리톤 주기 거리의 100 배까지로 하였고 인접 솔리톤간의 간격 T_d 는 기본 솔리톤 펄스폭의 8 배까지 하였다. 그림에서 어두운 영역은 최대 허용 오차백분율인 50% 이상으로 주어지는 영역이며 밝은 영역은 그 이하로 주어져 안전한 영역으로 볼 수 있다. Gordon의 최소 인접 솔리톤의 간격값인 5배의 경우 초기 오차 백분율은 약 0.5% 이었지만 솔리톤이 장거리로 전송됨에 따라 인접 솔리톤간의 상호 작용력에 의해 변형되어 최대 허용 오차 백분율이 50% 이하로 주어지는 최대 전송 거리는 기본 솔리톤 주기 거리의 약 38배로 주어짐이 그림 4로부터 확인되고 있다. 그러면 실제 이와같은 결과치에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 솔리톤 전송형태를 구해 보면 그림 5와 같이 주어진다.



(a) 3차원 분포도



(b) 등고선 그래프

그림 5. 동상 인접 기본 솔리톤의 전송형태($T_d=5$)

Fig. 5. Transmission format of fundamental solitons in in-phase. ($T_d=5$)

그림 5에서 보면 동상인 인접 솔리톤간의 시간 간격 값을 기본 솔리톤 펄스폭의 5배로 할 경우 초기 전송 거리에서는 큰 변화가 없다가 점차적으로 상호 작용력에 의해 흡인되어 (역상의 경우엔 반발력) 솔리톤 전송 거리가 약 기본 솔리톤 주기 거리의 약 38배에서 충돌이 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 그 이후의 전송 거리에서는 분리된후 다시 충돌이 일어남을 알 수 있다. 그러므로 기본 솔리톤 전송의 경우, 인접 솔리톤의 시간 간격값을 솔리톤 펄스폭의 5배로 하였을 때 초기 오차 백분율은 0.5% 이었지만 최대 허용 오차 백분율 (50%) 거리인 최대 전송 가능 거리는 솔리톤 주기 거리의 약 38배가 됨을 알 수 있다.

V. 결 론

고속 장거리 전송의 필요성에 의해 사용되고 있는 비선형 분산 광솔리톤 전송 기술에 있어서 가장 문제가 되고 있는 근접한 인접 솔리톤 상호간의 상호 작용력 특성을 분석하기 위해 본 논문에서는 무손실의 이상적인 경우로 한정하여 전송 속도를 결정짓는 광솔리톤간의 최적 시간 간격치를 결정하고자 하였다. 이를 위해 상호 작용력 발생의 원인을 광솔리톤 전송 이론에 근거하여 설명하였고 이 결과를 근거로 하여 비선형 특성에 의한 순시 주파수 변화량이 0가 되는 솔리톤 피크치의 시간 위치를 추적하여 분석하였다. 또한 상호 작용력으로 인한 솔리톤 포락선 최대치의 시간 위치 이동 값과 이상적인 경우와의 오차 값을 유도하여 상호 작용력으로 인한 오차 백분율을 관계식을 구한 후 분석하였다. 그 결과 단위 크기인 인접 솔리톤 상호 작용력의 영향으로 발생하는 펄스 간격의 이동 값에 의한 오차 백분율이 0.5%이하가 되기 위해서는 인접 솔리톤 펄스의 시간 간격이 솔리톤 펄스 폭의 5배이상 유지되어야 하며 이때의 솔리톤 최대 전송 거리는 기본 솔리톤 전송 거리의 약 38배로 주어짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Masataga, Nakazawa, "Soliton Transmission in Telecommunication Networks," *IEEE Communications*, pp. 34-41, Mar., 1994.
- [2] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill, pp. 48-79, 1983.
- [3] J. Gowar, *Optical Communication Systems*, Prentice-Hall, pp. 24-89, 1983.
- [4] A. Hasegawa, F. Tappert, "Transmission of Stationary Optical Pulses in Dispersive Dielectric Fibers," *App. Phy. Lett.*, Vol. 23, No. 3, pp. 142-144, Aug., 1973.
- [5] A. Hasegawa, Y. Kodama, "Signal Transmission by Optical Solitons in Monomode Fibers," *Proc. of IEEE*, Vol. 69, No. 9, pp. 1145-1150, Sep., 1981.
- [6] L. F. Mollenauer, B. M. Nyman, M. J. Neubelt, G. Raybon, S. G. Evangelides, "Demonstration of Soliton Transmission at 2.4Gbps over 12,000km," *Elect. Lett.*, Vol. 27, No. 2, pp. 178-179, Jan., 1991.
- [7] L. F. Mollenauer, S. G. Evangelides, H. A. Haus, "Long-Distance Soliton Propagation Using Lumped Amplifiers and Dispersion Shift Fiber," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, Vol. 9, No. 2., pp. 194-197, Feb., 1991.
- [8] J. P. Gordon, "Interaction Forces Among Solitons in Optical Fibers," *Opt. Lett.*, Vol. 8, No. 11, pp. 596-598, Nov., 1983.
- [9] F. M. Mitschke, L. F. Mollenauer, "Experiment Observation of Interaction Forces Between Solitons in Optical Fibers," *Opt. Lett.*, Vol. 12, No. 5, pp. 355-357, May, 1987.
- [10] A. Newel, J. Moloney, *Nonlinear Optics*, Addison Wesley, pp. 371-396, 1992.
- [11] B.E.A. Saleh, M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley Interscience, pp. 786-793, 1991.
- [12] J. P. Gordon, H. A. Haus, "Random Walk of Coherently Amplified Solitons in Optical Fiber Transmission," *Opt. Lett.* Vol. 11, No. 10, pp. 665-667, Oct., 1986.
- [13] C. Desem, P. L. Chu, "Soliton Interaction in the Presence of Loss and Periodic Amplification in Optical Fibers," *Opt. Lett.* Vol. 12, No. 5, May, 1987.

— 저 자 소 개 —



邊承宇(正會員)

1958년생. 1980년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사). 1983년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1991년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(박사수료).

1983년 3월 ~ 1984년 1월 한국전자통신연구소 연구원. 1984년 1월 ~ 현재 연암공업전문대학 전자과 교수. 주관심분야는 광통신시스템, 광펄스전송 등임

宋在元(正會員)

1955년생. 1978년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사). 1980년 2월 한국과학기술원 전기공학과(공학석사). 1984년 2월 한국과학기술원 전기공학과(공학박사). 1984년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수. 1994년 1월 ~ 현재 경북대학교 전자계산소 소장. 주관심분야는 광통신시스템, 광집적회로 등임