

광선로 전파방정식 계산을 위한 SSF 알고리즘 개선에 관한 연구

김민철 · 김종훈

승실대학교 정보통신공학과

(1999년 6월 30일 받음, 1999년 10월 12일 수정본 받음)

SSF 알고리즘의 고정된 구간을 개선하여 자동으로 구간을 선택함으로써 계산시간을 줄인 Auto Z-step과, SSF 알고리즘에 사용되는 FFT 방법의 표본값을 자동적으로 줄여서 계산시간을 감소시킨 Auto T-step 알고리즘을 제안했다. 2.5 Gbps 100 km 전송시 이 두 알고리즘을 사용한 것은 기존의 1 km fixed step 알고리즘보다 최대 1/120의 계산시간이 줄었고, 10 Gbps 40 km 전송시 최대 1/56으로 줄었으며, 오차는 모두 -30 dB 이하였다. eye diagram으로 1 km fixed step 알고리즘과 비교할 때 오차가 무시될 수 있음을 알 수 있었다.

I. 서 론

광선로에서 신호는 크게 색분산, 비선형 현상, 그리고 손실(absorption)에 영향을 받으며, 광선로의 신호변화를 계산하기 위해서는 이러한 요소를 모델로 한 비선형 슈레딩거 방정식을 풀어야 한다. 이를 풀기 위한 수치 해석적인 방법으로 주로 finite difference 방법과 pseudospectral 방법이 사용된다. finite difference 방법에는 대표적으로 hopscotch 방법,^[1] Crank-Nicolson 구조, Ablowitz와 Ladik 구조가 있고, pseudospectral 방법은 split step fourier (SSF) 방법,^[2] Fornberg와 Whitham에 의한 pseudospectral 방법^[3]이 있다. 이들 중 일반적으로 계산시간이 가장 빠른 SSF 알고리즘을 사용한다.^[4] SSF 알고리즘에서 계산시간에 가장 큰 영향을 주는 것은 계산구간(step size)길이 이다. 기존의 SSF 방법은 고정된 작은 구간을 광선로 길이를 따라 일률적으로 사용한다. 만약 기존의 방법과 거의 동일한 정확도를 가지면서 구간을 더 크게 할 수 있다면 계산시간을 대폭 줄일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 색분산 거리와 비선형 거리(nonlinear length)의 관계에서 구간을 자동으로 선택하는 Auto Z-step 알고리즘을 제안하였다. 또한 SSF 알고리즘에서 사용하는 finite fourier transform(FFT) 방법의 표본값 N 을 주파수영역의 스펙트럼을 이용하여 줄이므로 계산시간을 줄인 Auto T-step 알고리즘을 제안하였다.

II. SSF 알고리즘

비선형 슈레딩거 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$j\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{j}{2}\alpha A + \frac{1}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma|A|^2 A \quad (1)$$

여기서 A 는 광신호의 포락선(envelope)을 나타내며, α , β_2 , γ 는 각각 광섬유의 손실, 색분산, 비선형 효과를 나타내는 상수이다. 광신호의 진행 방향은 z 방향이며 시간 T 는 광신호가

선로를 따라 진행하는 군속도(group velocity)로 움직이는 좌표에서의 시간을 뜻한다. 식 (1)에서도 알 수 있듯이 광선로 내에서는 색분산과 비선형 효과가 동시에 나타난다. 두 효과를 동시에 고려하는 것은 매우 까다롭고 어려운 것이다. SSF 알고리즘에서는 광선로 길이를 아주 작은 구간 h 로 나누어서 두 효과가 구간 h 마다 별개로 일어나는 것처럼 가정하여 식 (1)을 다음과 같이 다시 쓴다.

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (2)$$

$$\hat{D} = -\frac{j}{2}\beta_2\frac{\partial^2}{\partial T^2} - \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

$$\hat{N} = j\gamma|A|^2 \quad (4)$$

\hat{D} 은 선형 연산자로서 색분산과 감쇠, \hat{N} 은 비선형 연산자로서 SPM 현상을 나타낸다.^[5]

III. Auto Z-step 알고리즘

3.1. 최적구간(optimum step size)

SSF 알고리즘에서 계산구간 길이는 매우 중요하다.

$$\text{계산시간} \propto \frac{1}{\text{step size}} \quad (5)$$

$$\text{오차} \propto \text{step size}^3 \quad (6)$$

식 (5), (6)의 관계에서처럼 구간 길이에 따라 계산시간, 오차가 영향을 받기 때문이다. 그러므로 계산시간과 오차와의 관계에서 최적 구간(optimum step size)을 정하여 계산시간이 짧으면서 오차 또한 적게 해야 한다. 광선로에서 거리 L 은 색분산 거리인 L_D 와 비선형 거리인 L_{NL} 에 영향을 받는다. 두 거리는 다음과 같이 정의된다.^[6-8]

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma|P|_{\text{peak}}} \quad (7)$$

$$L_D = T_0^2 \times \left| \frac{2\pi c}{\lambda^2 D} \right| \quad (8)$$

γ 는 비선형 상수, $|P|_{peak}$ 는 펄스의 최대 전력, T_0 는 가우시안 펄스의 반치폭, c 는 광속도, λ 는 펄스의 파장, D 는 색분산 상수를 나타낸다. 일반적으로 통신에서는 색분산의 영향이나 SPM의 영향을 피하기 위해 식 (9)과 같이 세 거리의 관계를 얻는다.

$$L \ll L_D, L \ll L_{NL} \quad (9)$$

따라서 반복하는 단계 각각의 구간에서 취할 수 있는 가장 큰 구간은 L_D 와 L_{NL} 둘 중에 더 작은 거리이다. 따라서 본 연구에서는 각 단계별로 계산구간 길이를 결정할 때 색분산 거리와 비선형 거리를 각각 구하고 서로 비교하여 짧은 거리를 구간으로 결정하였다.

3.2. 펄스 스펙트럼에 의한 색분산 거리의 결정

식 (8)을 통해 정의된 L_D 는 시간영역에서 펄스의 반치폭의 제곱에 비례한다. 이런 방법에 의한 L_D 의 결정은 다음과 같은 커다란 약점을 가지고 있다.

그림 1(a)~(c)는 시간영역에서의 펄스이고, (d)~(f)는 그 펄스에 대한 스펙트럼이다. (a), (b)는 단일펄스이고 T_0 가 크고 작은 경우이며, (c)는 광통신에서 쓰이는 광펄스열(optical pulse stream)이다. 단일펄스의 경우 T_0 를 쉽게 구할 수 있으므로, 식 (8)에 의해 L_D 도 쉽게 구할 수 있다. 그러나 (c)와 같은 펄스열의 경우는 적당한 T_0 를 정의하기가 어렵다. 한편 이러한 길이가 다른 펄스열의 스펙트럼은 이와는 달리 (d)~(f)와 같이 D.C를 중심으로 하나의 펄스 형태를 가지므로 상대적으로 정확한 펄스폭(대역폭)을 정의할 수 있으며 이를 Δf_d 라 할

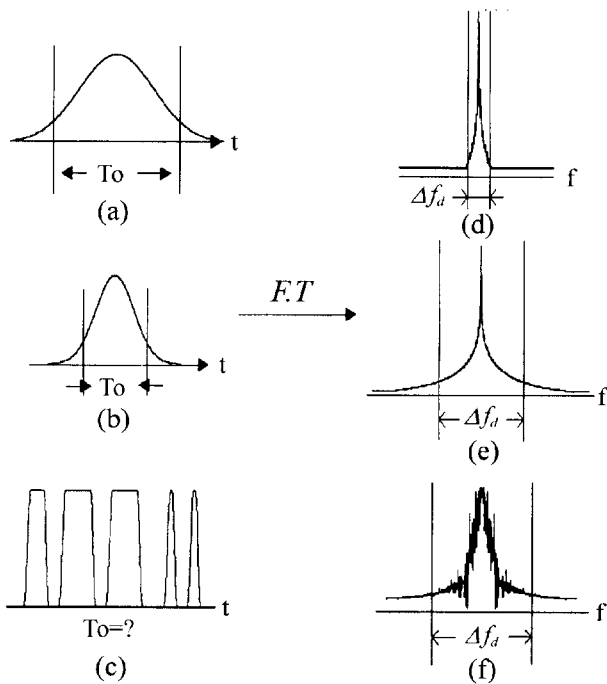


그림 1. T_0 와 Δf_d 의 결정 방법.

때 시간 축의 펄스 폭 T_0 와는 대략 반비례 관계를 가진다. 그러므로 본 연구에서는 주파수영역의 대역폭 Δf_d 안의 에너지비 E_{frac} 을 임의로 선정하여 L_D 를 결정하였다. 에너지비 E_{frac} 은 다음과 같이 정의했다.

$$E_{frac}(\%) = \frac{E_{eff}}{E_{total}} \times 100 \quad (10)$$

E_{eff} 은 Δf_d 안의 유효 에너지, E_{total} 은 스펙트럼의 총 에너지를 나타낸다. E_{frac} 은 총 에너지와 Δf_d 안의 에너지비를 나타내며, 단위는 없고 백분율로 표시한다. 이 값을 만족하는 유효에너지 E_{eff} 를 구하고 그 스펙트럼의 대역폭을 Δf_d 라고 정의한다. Δf_d 을 이용하여 새롭게 정의한 L_D 는 다음과 같다.

$$L_D = \frac{1}{(\zeta \times \Delta f_d)^2} \times \left| \frac{2\pi c}{\lambda^2 D} \right| = T_{eff}^2 \times \left| \frac{2\pi c}{\lambda^2 D} \right| \quad (11)$$

ζ 는 임의로 정한 비례상수이다. T_{eff} 는 기존의 T_0 를 보완한, Δf_d 의 역수인, 시간영역에서의 펄스폭이라 할 수 있고, 식 (12)으로 나타낸다.

$$T_{eff} = \frac{1}{\zeta \times \Delta f_d} \times N_{Sample} \quad (12)$$

N_{Sample} 은 FFT를 위한 표본값으로 본 연구에서는 2.5 Gbps 자료 256 비트로 32번 표본화하여 전송하기 위해 8192를 택했다. 본 연구에서 사용한 FFT는 2ⁿ을 표본값으로 한다.

IV. Auto T-step 알고리즘

SSF 방법은 광선로 전파방정식의 선형 연산자 \hat{D} 의 값을 구하기 위해 푸리에변환으로 주파수영역에서 계산하고, 역푸리에변환을 통해 미분 방정식의 해인 $A(z+h, T)$ 를 얻는 방식이다. 이 푸리에변환은 FFT 알고리즘을 이용하여 구한다. 본 연구에서 전산 모의실험에 사용했던 표본값은 8192이다. 이 8192개의 배열 안에 2.5 Gbps 자료 256 비트를 넣어 모의실험하고 그 결과의 스펙트럼을 분석한 결과 총 에너지의 99%에 해당하는 에너지가 표본값의 1/4에 해당하는 2048내에 존재하고, 나머지는 0이거나 거의 0에 가까운 값을 알게 되었다. 표본값을 N 이라고 할 때 FFT 방법의 계산시간은 $N \log_{10} N$ 에 비례하므로, 원래의 표본값인 8192개보다 총 에너지의 99%에 해당하는 에너지의 안쪽의 표본값인 2048개를 새로운 표본값으로 사용한다면 계산시간이 더욱 단축됨을 알 수 있다. 이것은 식 (10)에서 에너지의 비 E_{frac} 을 100%가 아닌 임의의 값으로 선정할 때 그 에너지비에 해당하는 새로운 표본값을 구하며, 이 에너지비는 Auto Z-step의 L_d 를 구하기 위한 E_{frac} 과 구별하기 위해 $E_{<frac>}$ 이라고 한다.

그러나 FFT 방법의 계산시간이 표본값이 적다고 해서 항상 감소하지는 않는다. 그 이유는 FFT 방법이 2ⁿ에 해당하는 값들을 표본값으로 취하는 것이 기본이고, 표본값이 2ⁿ에 해당하는 값이 아닌 경우는 그 값을 소인수분해할 때 나오는 여러 소수 중 가장 큰 소수에 해당하는 부 알고리즘을 가지고 동작하기 때문이다.^[9] 즉 표본값의 가장 큰 소수에 따라 계산시간

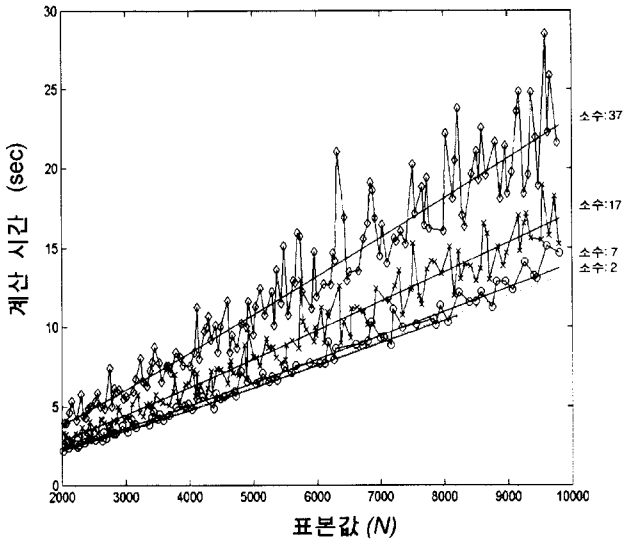


그림 2. 표본값의 소수에 따른 FFT 알고리즘의 계산시간.

이 달라진다. 그림 2는 FFT 방법을 200번 동작시킬 경우 표본값을 2000부터 9800까지 변화시키면서 소수에 따른 계산시간을 fitting하여 비교한 것이다. 여기서 소수로 {2, 7, 17, 37}을 사용하였다.

소수가 {2}인 표본값들과 그 보다 큰 소수를 가지는 표본값들을 비교했을 때, 표본값이 클수록 불구하고 계산시간이 적게 걸린 것을 알 수 있는데 그 이유는 FFT의 부 알고리즘에 의해서 계산되었기 때문이다.

본 연구에서는 표본값을 최대한 줄이되, 그 값의 소수가 큰 경우는 표본값이 조금은 크더라도 소수가 작은 것으로 표본값을 정했으며, 소수의 최적의 배열수를 {2, 3, 5, 7}로 설정하였다. Auto T-step 알고리즘은 정의에서 알 수 있듯이 표본값을 줄여서 계산시간을 줄이는 것이므로 광선로의 전송에 독립적으로 사용될 수 없고 전송에 관계된 알고리즘과 함께 사용되어야 한다. 그래서 Auto Z-step 알고리즘과 함께 사용하였다.

V. 전산 모의실험 결과 및 분석

본 연구의 결과 자료들은 CPU가 Intel MMX 200인 PC를 사용하여 얻은 것이다. 가우시안 펄스를 단일 모드 광섬유에서 전송하는 실험은 D. Marcuse에 의해 이루어졌다.^[10] 본 연구의 전산 모의실험에서 사용된 입력 펄스는 차수 m을 1.5로 놓은 슈퍼-가우시안 (super-gaussian) 펄스이다.^[11] 본 연구에서 말하는 오차는 각 경우에 참조자료와 비교하는 자료사이의 다음과 같은 관계를 이용하여 구했다. diff는 오차이고, a_i 는 i번째 참조자료이고, b_i 는 i번째 비교하는 자료이고, 표본값을 N이라고 할 때,

$$diff = \frac{\sum_{i=1}^{2 \times N} (a_i - b_i)^2}{\sum_{i=1}^{2 \times N} (a_i)^2} \quad (13)$$

식 (13)은 root mean square(RMS) 오차이다. 비교하는 자료를 $2 \times N$ 라고 한 것은 허수 때문이다. 비트율 10 Gbps, 파장 1550 nm 경우 입력펄스의 최대전력을 -6 dBm에서부터 15 dBm까지 변화시키면서 100 km까지 전송했을 때, 구간을 자동 선택하게 한 Auto Z-step 알고리즘과 기존의 fixed step SSF 알고리즘과의 계산시간을 비교해 보았고, 구간 길이가 10 m인 fixed step과 비교하였을 때의 오차를 보였고, Auto Z-step 알고리즘의 구간거리를 결정하는 방법을 보였고, 기존의 fixed step과 계산 거리를 비교하였다. 또 Auto T-step을 사용한 알고리즘에서 E_{frac} 를 변화시켰을 때 그에 따른 계산시간과 오차의 변화를 살펴보고, 마지막으로 비트율 2.5 Gbps, 10 Gbps 경우의 전송로 길이에 따른 Auto T-step을 사용한 알고리즘, Auto Z-step, 그리고 fixed step의 계산시간을 비교해 보았고, 계산오차가 실제 자료에 영향을 미치지 않음을 eye diagram을 통해 확인했다. 전산 모의실험에서 공통적으로 사용되는 중요한 파라미터는 $D = 17$ ps/nm-km, $SPM = 5/W$ -km, 손실 0.2 dB/km, 표본값은 8192, 파장 1550 nm, 2^8-1 Pseudo random code이다.

5.1. Auto Z-step과 fixed step 알고리즘의 계산시간과 계산 오차의 비교

그림 3은 비트율 10 Gbps를 사용하였고, 입력펄스의 광전력을 -6 dBm에서부터 15 dBm까지 변화시키면서 100 km 전송할 때의 계산시간을 비교하였다.

그림 3의 두 곡선 중에서 위의 것은 기존의 fixed step 알고리즘을 통해 얻은 계산시간이고, 아래의 것은 Auto Z-step 알고리즘을 통해 얻은 계산시간이다. 그 곡선들 위에 표시된 수치는 Auto Z-step 알고리즘을 통해 100 km를 전송한 후의 오차로 단위는 dB이다. 그림 3은 Auto Z-step으로 각 입력 전력에 따라 E_{frac} 를 40%에서 80%까지 변화시키며 100 km를 전송하여 계산시간과 계산오차를 얻었고, 그 후 같은 입력 전력을 가질 때, fixed step 알고리즘에서 구간을 1 km부터 20 km까지 증가시키면서 같은 계산오차를 가지는 경우의 계산시간을 구하여 그렸다. 각 오차는 10 m의 구간을 갖는 fixed step 알고리즘에 대한 RMS 오차이다. 10 m의

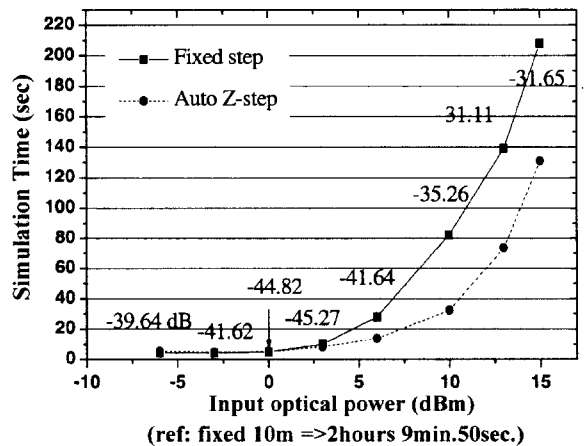


그림 3. Auto Z-step과 fixed step 알고리즘의 계산시간.

구간을 갖는 fixed step 알고리즘의 자료가 실제 시스템의 결과와 거의 차이가 없는 점을 통해, 이 자료를 기준으로 잡아서 상대적인 오차를 구하였다. 그림 3을 통해 각 입력펄스의 전력에 대해 본 연구에서 제안한 Auto Z-step은 기존의 fixed step 알고리즘에 비해, 계산시간을 대략 1/2로 줄임울 알 수 있었다.

5.2. Auto Z-step 알고리즘의 E_{frac} 에 따른 계산오차

그림 4는 그림 3과 같은 조건을 가진다. Auto Z-step 알고리즘은 E_{frac} 을 40%에서 80%까지 변화시키면서 각 입력 전력 마다 10 m fixed step 알고리즘과 비교하여 구한 오차이다.

Auto Z-step 알고리즘은 각 입력전력에 대하여 최대허용오차를 -30 dB로 두었는데 이보다 적은 오차를 가짐을 알 수 있었다.

그림 5는 그림 3에서 입력전력이 6 dBm, 계산오차가 -41.63 dB, E_{frac} 가 40%인 경우 Auto Z-step 알고리즘의 구간거리와 같은 계산오차를 가지는 fixed step 알고리즘의 구간거리를 비교한 것이다. 그리고 표 1은 Auto Z-step 알고리즘의 구간거리를 결정하는 방법을 나타낸 것이다.

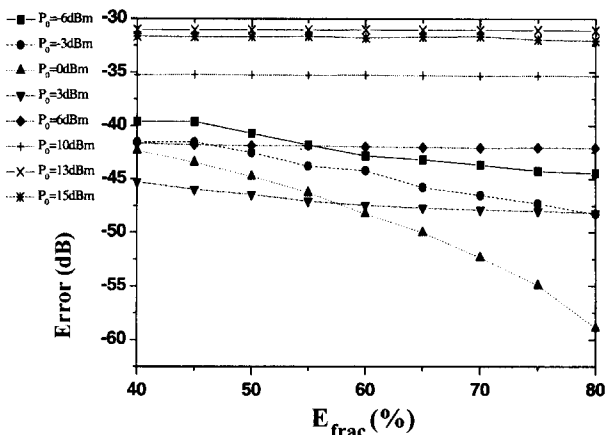


그림 4. 각 입력전력에서 10 m fixed step 알고리즘에 대한 Auto Z-step 알고리즘의 계산오차.

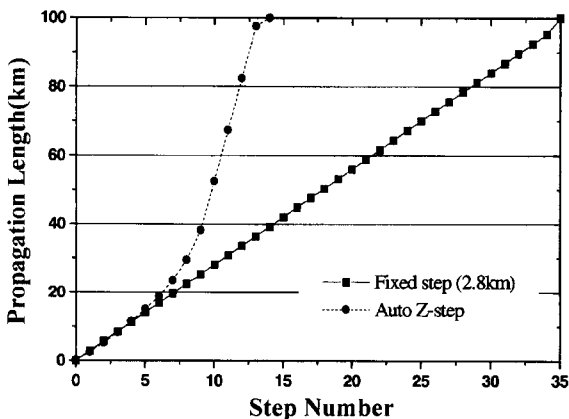


그림 5. 입력 전력 6 dBm, 계산오차 -41.63 dB, E_{frac} 40%에서 Auto Z-step과 fixed step 알고리즘의 구간 비교.

표 1. 입력전력 6 dBm, E_{frac} 40%, 계산오차 -41.63 dB에서 Auto Z-step 알고리즘의 구간결정

step	전송거리 (km)	구간거리 (km)	L_{NL} (km)	L_D (km)	Δf_d [GHz]	T_{eff} (ps)
1	0	2.5	50.0	274	6.48	77
2	2.5	2.7	53.93	274	6.48	77
3	5.2	3.02	60.31	280.94	6.41	78
4	8.22	3.22	64.39	280.94	6.41	78
5	11.44	3.56	71.19	280.94	6.41	78
6	15.0	3.78	75.55	280.94	6.41	78
7	18.78	4.7	93.92	287.92	6.33	79
8	23.48	5.97	119.32	287.92	6.33	79
9	29.45	8.64	172.75	287.92	6.33	79
10	38.09	14.43	288.65	295.17	6.25	80
11	52.52	14.76	687.79	295.17	6.25	80
12	67.28	15.13	1476.94	302.69	6.17	81
13	82.41	15.13	3650.09	302.69	6.17	81
14	97.54	2.46	5029.32	302.69	6.17	81
15	100					

그림 5는 그림 3에서 입력전력이 6 dBm, 계산오차가 -41.63 dB, E_{frac} 가 40%인 경우 Auto Z-step 알고리즘의 구간거리와 같은 계산오차를 가지는 fixed step 알고리즘의 구간거리를 비교한 것이다. 그리고 표 1은 Auto Z-step 알고리즘의 구간거리를 결정하는 방법을 나타낸 것이다.

Δf_d 는 대역폭, T_{eff} 는 식 (12)에서 정의한 값이고, L_D 는 색분산 거리, L_{NL} 은 비선형 거리이다. 각 단계(step)마다 L_D 와 L_{NL} 을 비교하여 작은 길이에 비례상수를 곱해서 구간을 결정했다. 구간을 살펴보면, L_{NL} 은 큰 최대전력으로 인해 처음에는 매우 짧다(전송거리 40 km 정도). 이 거리까지는 L_D 가 더 길어서 구간거리는 L_{NL} 에 의해 결정된다. 전송거리가 늘어남에 따라 L_{NL} 은 광선로의 손실에 의해 최대전력이 줄어들면서 전송거리 40 km 정도부터는 급격히 늘어난다. 펄스가 전송됨에 따라 색분산에 의한 펄스퍼짐이 일어나므로 Δf_d 가 줄어들어, L_D 가 늘어나고 시간영역의 펄스폭 T_{eff} 또한 늘어난다. 이때는 각 단계에서 L_{NL} 이 크므로 구간은 L_D 에 의해 결정되었다. 그림 5를 보면 동일한 오차를 가진 fixed step 알고리즘의 구간이 2.8 km로 고정되어 전송 거리가 선형적으로 늘어나는 반면, Auto Z-step 알고리즘으로 구해진 구간은 지수 함수적으로 늘어나서, 전송거리가 지수함수적으로 늘어났다. 결과적으로 계산시간이 대략 1/2로 줄었다.

5.4. Auto T-step을 사용한 알고리즘과 fixed step의 계산시간 비교와 계산오차

그림 6은 입력전력 0 dBm, 비트율 10 Gbps를 사용하였다. E_{frac} 는 45%로 하였다. E_{frac} 은 99.99%부터 99.9968%까지 변화시켰다.

그림 6의 X축에 해당하는 E_{frac} 이다. X축 위에 숫자가 쓰여있는데 이것은 E_{frac} 에 해당하는 새로운 표본값이다. 그림 6이나 표 2를 볼 때 같은 Auto Z-step을 사용하였는데도, 계산시간에 차이를 보이는 것은 Auto T-step때문이다. 그림 6의

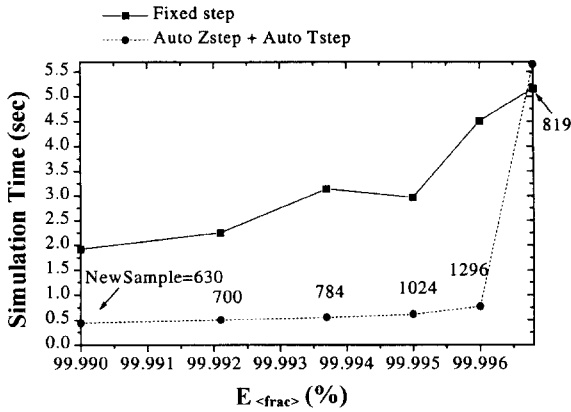


그림 6. Auto T-step을 사용한 알고리즘에서 E_{frac} 에 따른 새로운 표본값과 fixed step 알고리즘의 계산시간 비교.

표 2. Auto T-step 알고리즘을 사용한 경우 E_{frac} 에 따른 계산 시간과 계산오차

E_{frac} (%)	99.99	99.9921	99.9937	99.995	99.996	99.9968
표본값	630	700	784	1024	1296	8192
계산시간 (sec)	0.44	0.5	0.55	0.61	0.77	5.65
fixed step 알고리즘의 계산시간 (sec)	1.92	2.25	3.14	2.97	4.51	5.16
계산오차 (dB)	-24.8	-26.6	-28.62	-33.56	-41.76	-43.46

맨 오른쪽에는 표본값이 8192이며 이것은 Auto T-step 알고리즘을 사용하지 않은 경우와 같다. 동일한 계산오차를 갖는 fixed step 알고리즘과 표본값을 줄인 것의 계산시간은 표 2에 나타냈고 최대 1/5정도로 줄었다. 표 2를 보면 E_{frac} 99.9937%까지는 계산오차가 비교적 크지만, 99.995%나 99.996%의 경우는 E_{frac} 99.9968%이고 표본값이 8192개인 그냥 Auto Z-step과 비교할 때 크게 차이가 없었다.

5.5. 제안한 두 알고리즘과 fixed step의 전송거리에 따른 계산시간의 비교와 계산오차

5.5.1. 비트율 2.5 Gbps

그림 7에 사용된 파라미터는 비트율 2.5 Gbps, E_{frac} 45%이고, E_{frac} 99.996%이다. 그림 7은 전송로 길이에 따른 각 알고리즘의 계산시간을 나타낸 것이고, 표 3은 전송로 길이마다 1 km의 고정된 구간을 갖는 fixed step, Auto Z-step, 그리고 Auto Z-step과 Auto T-step을 동시에 사용한 알고리즘의 계산시간과 계산오차를 나타냈다.

표 3. 2.5 Gbps 경우 각 알고리즘의 전송로 길이에 따른 계산시간과 계산오차

전송로길이 (km)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
계산시간 (sec)	fixed step (1 km)	7.42	14.94	22.03	30.76	38.94	45.31	50.58	54.98	60.69	66.24
	Auto Z-step	1.59	1.76	2.74	2.75	2.69	3.68	3.52	3.62	3.68	3.57
	Auto T-step	0.39	0.28	0.44	0.44	0.44	0.55	0.55	0.6	0.55	0.55
계산오차 (dB)	Auto Z-step	-63.62	-59.37	-53.41	-51.55	-47.46	-43.74	-43.65	-43.28	-42.6	-41.17
	Auto T-step	-46.39	-45.87	-45.12	-44.59	-43.25	-41.7	-41.6	-41.31	-40.81	-40.13

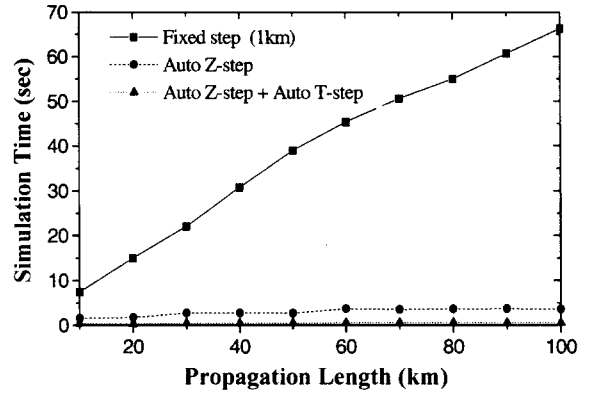


그림 7. Gbps 경우 전송로 길이에 따른 각 알고리즘의 계산시간.

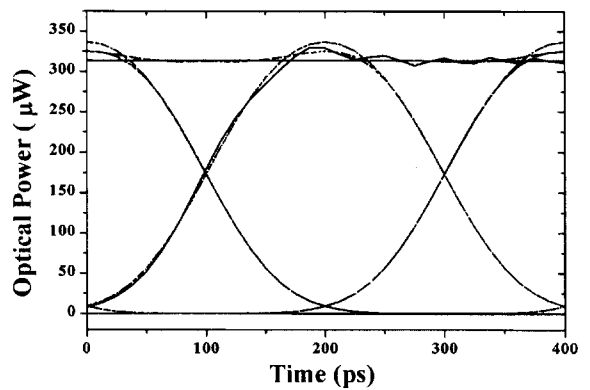


그림 8. 2.5 Gbps, 10 km 전송시에 1 km fixed step 알고리즘의 eye diagram.

Auto Z-step과 Auto T-step을 동시에 사용한 알고리즘은 1 km fixed step의 경우보다 100 km 전송에서 계산시간이 대략 1/120으로 줄었고 Auto Z-step보다 대략 1/6으로 줄었다. 그에 따른 계산오차는 1 km fixed step 알고리즘과 비교했을 때, 100 km 전송시 Auto Z-step과 Auto T-step을 동시에 사용한 알고리즘은 -40.13 dB이었고 Auto Z-step만을 사용한 알고리즘은 -41.17 dB이었다.

그림 8은 1 km fixed step, 그림 9는 Auto Z-step, 그림 10은 Auto Z-step과 Auto T-step을 동시에 사용하는 알고리즘으로 2.5 Gbps, 100 km 전송 후에 얻은 eye diagram이다. 이 개선된 두 알고리즘이 fixed step 알고리즘과 비교하여 얻어진 계산오차는 무시할 수 있다. 여기서 최대허용오차는 -30 dB로 하였다.

5.5.2. 비트율 10 Gbps

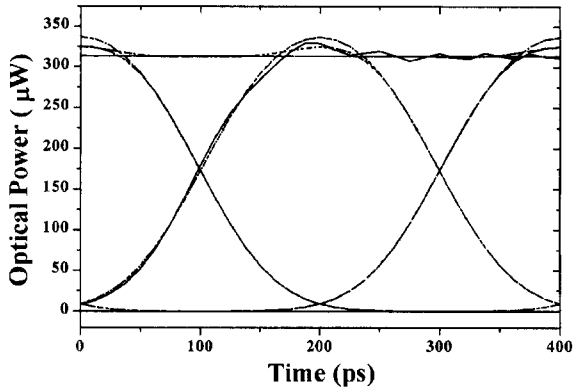


그림 9. 2.5 Gbps, 10 km 전송시에 Auto z-step 알고리즘의 eye diagram.

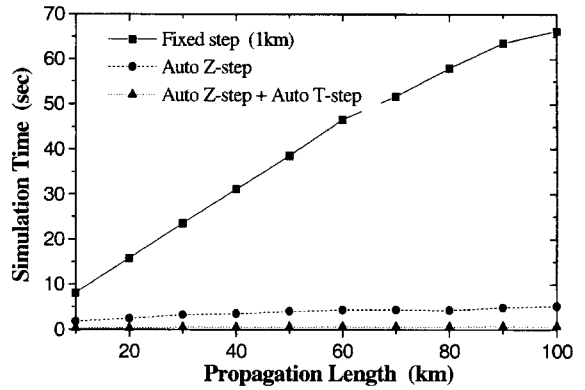


그림 11. 10 Gbps일때 전송로 길이에 따른 각 알고리즘의 계산시간.

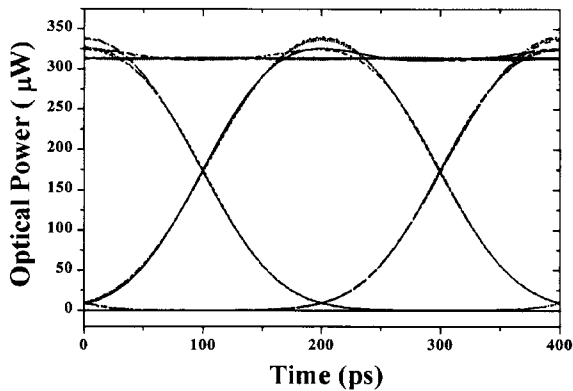


그림 10. 2.5 Gbps, 100 km 전송시에 Auto Z-step과 Auto T-step을 동시에 사용한 알고리즘의 eye diagram.

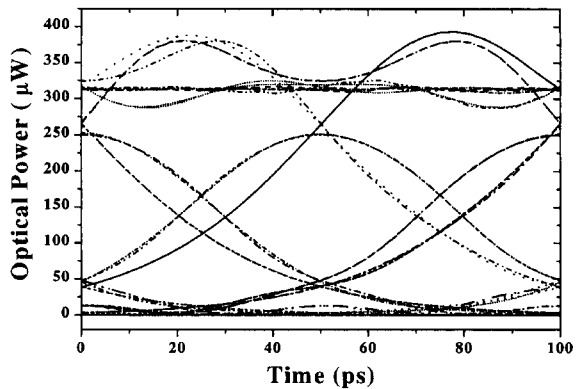


그림 12. 10 Gbps, 40 km 전송시에 1 km fixed step 알고리즘의 eye diagram.

그림 11에 사용된 파라미터는 비트율 10 Gbps, E_{frac} 45% 이고, $E_{<frac>$ 99.996%이다. 그림 11과 표 4에서 볼 때 Auto T-step과 Auto Z-step을 동시에 사용한 것은 1 km의 fixed step 알고리즘의 경우보다 100 km 전송에서 계산시간이 최대 1/86으로 줄었고, 개선된 두 알고리즘을 상호 비교할 때 Auto Z-step 알고리즘만을 사용한 것보다도 1/6으로 줄었다. 계산오차는 100 km를 전송할 때가 제일 큰데, 1 km fixed step과 비교하여 Auto Z-step은 -43.46 dB, Auto Z-step과 Auto T-step을 동시에 사용한 알고리즘은 -41.76 dB이었다. 그림 12부터 그림 14까지는 10 Gbps를 40 km로 전송할 때의 eye diagram이다. 그림 12는 fixed step, 그림 13은 Auto Z-step, 그림 14는 Auto T-step을 동시에 사용한 알고리즘이다.

각 계산오차는 Auto Z-step -51.66 dB, Auto Z-step과 Auto T-step을 동시에 사용한 알고리즘은 -45.54 dB이었다. 최

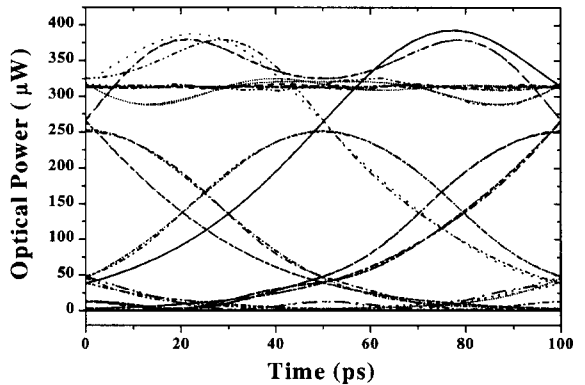


그림 13. 10 Gbps, 40 km 전송시에 Auto Z-step 알고리즘의 eye diagram.

표 4. 10 Gbps 경우 각 알고리즘의 전송로 길이에 따른 계산시간과 계산오차

전송로길이 (km)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
계산시간 (sec)	fixed step (1 km)	8.07	15.77	23.57	31.09	38.51	46.52	51.68	57.95	63.6	66.29
	Auto Z-step	1.81	2.47	3.29	3.52	4.06	4.34	4.39	4.28	4.89	5.22
	Auto T-step	0.33	0.39	0.55	0.55	0.6	0.65	0.66	0.66	0.76	0.77
계산오차 (dB)	Auto Z-step	-61.98	-58.65	-54.52	-51.66	-46.73	-46.6	-45.97	-44.83	-43.48	-43.46
	Auto T-step	-46.45	-46.46	-46.12	-45.54	-43.71	-43.64	-43.31	-42.64	-41.77	-41.76

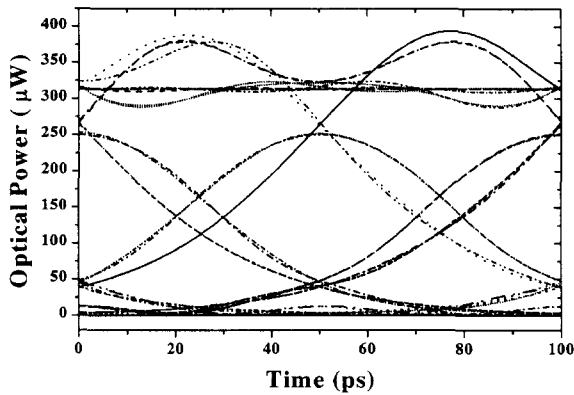


그림 14. 10 Gbps, 40 km 전송시에 Auto Z-step과 Auto-T-step을 동시에 사용한 알고리즘의 eye diagram.

대허용오차와 비교할 때 이 두 제안된 알고리즘이 갖는 1 km fixed step에 의한 계산오차는 무시할 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 광선로 전파방정식의 해를 구하는 기존의 SSF 알고리즘이 계산과정에서 구간을 fixed step으로 나누어서 계산하는 것을 개선하여, L_D 와 L_{NL} 사이에서 자동으로 구간을 결정하는 Auto Z-step 알고리즘을 제안했고, 또 SSF 알고리즘의 FFT 방법에 사용되는 표본값을 줄이므로 계산 속도를 빠르게 하는 Auto T-step 알고리즘을 제안했다. Auto Z-step에서 색분산 거리(chromatic dispersion length)가 시간영역에서는 구해지기 어려운 점을 해결하기 위해, 색분산 거리를 주파수영역에서의 대역폭 Δf_d 를 이용하여 구하는 방법을 제안했다. 입력전력을 -6 dBm에서 15 dBm까지 변화시키며 동일한 계산오차를 갖는 Auto Z-step을 fixed step과 비교할 때 구간은 지수함수적으로 증가되었고, 계산시간이 대략 1/2로 줄어들음을 확인했다. 이에 따른 계산오차는 10 m fixed step 알고리즘과 비교할 때 최대허용오차인 -30 dB이하로서 따라서 계산오차는 미약하여 무시할 수 있다. Auto T-step 알고리즘을 사용하여 E_{frac} 에 따른 표본값의 변화와 1 km fixed step 알고리즘과 비교하여 계산시간이 최대 1/5까지 줄어들음을 보였다. 또

2.5 Gbps를 100 km 전송할 때 1 km fixed step에 비해 Auto Z-step과 Auto T-step을 동시에 사용한 알고리즘이 최대 1/120으로 계산시간이 줄었고, 10 Gbps를 40 km 전송할 때에 계산시간이 1/56으로 줄어들었다. eye diagram을 통해 각 계산오차가 무시 될 수 있음을 보였다. 따라서 제안한 Auto Z-step과 Auto T-step을 동시에 사용한 알고리즘을 fixed step 대신 사용할 경우 거의 동일한 오차를 가지며 계산오차를 크게 줄일 수 있다.

본 연구에서 제안한 Auto Z-step과 Auto T-step은 단일채널의 분석에 사용되며 향후에 WDM 시스템의 분석을 위해서는 채널간의 영향을 고려한 알고리즘이 개발되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] I. S. Greig, J. Li Morris, J. Comp. Phys. **20**, 60 (1976).
- [2] R. H. Hardin, F. D. Tappert, Siam-Signum Fall Meeting, Austin, Tx, Oct., 1972; Siam Rev. Chronicle **15**, 423 (1973).
- [3] B. Fornberg, G. B. Whitham, Phil. Trans. Roy. Soc. **289**, 373 (1978).
- [4] T. R. Taha, M. J. Ablowitz, J. Comp. Phys. **55**, 203 (1984).
- [5] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics (Academic Press, New York, 1995), Chap. 2.
- [6] I. N. Sisakyan, A. B. Shvartsburg, Sov. J. Quantum Electron. **14**, 1146 (1984).
- [7] S. A. Akhmanov, V. A. Vysloukh, and A. S. Chirkin, Optics of Femtosecond Laser Pulses (American Institute of Physics, New York, 1992), Chap. 1.
- [8] G. P. Agrawal, in Supercontinuum Laser Source, R. R. Alfano, Ed. (Springerverlag, Heidelberg, 1989), Chap. 3.
- [9] J. W. Cooley and J. W. Tukey, Math. Comput. **19**, 297.
- [10] D. Marcuse, Appl. Opt. **19**(10), 1653, 5 (1980).
- [11] G. P. Agrawal, and M. J. Potasek, Opt. Lett. **11**, 318 (1986).

A Study on the SSF algorithm improvement for the optical propagation simulation

Min Cheoul Kim and Chong Hoon Kim

Department of Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received June 30, 1999, Revised manuscript received October 12, 1999)

We propose an effective algorithm, which can predict the detailed behavior of the intensity-modulated high speed optical signal after propagating through an optical fiber. The algorithm is based on the SSF (Split Step Fourier) Method, however, the step size is automatically calibrated in each calculation step to reduce the number of calculations within given round-off error bound. Applying the algorithm to the 2.5 Gbps 100 km transmission and 10 Gbps 40 km transmission simulations, we achieved the calculation time reduction by maximum 1/120 and 1/56 of the calculation time by using the SSF fixed step algorithm previously known. The root-mean-square of the round-off error was kept within -30 dB compared to the signal level throughout the calculation.