

비선형 분산 광 전송 매질에 있어서 인접 광 솔리톤간의 신뢰도 및 최대 전송 거리 분석

논문
9-3-2

Reliability and Maximum Transmission Length Analysis Between Adjacent Optical Solitons in Nonlinear Dispersive Transmission Materials

변승우*, 김종규*, 송재원**
(Seung-Woo Byun, Jong-Kyu Kim, Jae-Won Song)

Abstract

In optical soliton transmission systems with nonlinear dispersive materials, which is utilized for ultra-long and high bit rate transmission, it is shown that the value of initial time difference between adjacent solitons is analyzed for optimum bit rate. The method is inducted by uncorrelation condition with minimum interaction forces in initial covariance coefficient between adjacent solitons. When the initial time difference is 6 times of soliton pulse width by the results, it is shown that the reliability is maintained with more than 90% within transmission length of soliton period, multiplied by 93.

Keywords(주요용어) : Optical soliton (광 솔리톤), Nonlinear dispersive materials (비선형 분산 매질), Reliability (신뢰도), Maximum transmission length (최대 전송거리), Auto-covariance coefficient (자기 공분산계수)

I. 연구 배경 및 목적

최근 장거리의 고속 정보 통신을 위한 광 솔리톤 응용 시스템에 관한 연구가 많이 보고되고 있다. 비선형 분산 특성을 갖는 광섬유를 이용한 광 펄스 전송 시스템에 있어서 가장 문제가 되는 현상은 광 펄스 전송로의 손실 특성과 비선형 분산 특성이다^{1,3)}. 광 펄스의 분산 특성을 광섬유가 가지고 있는 비선형 특성을 이용하여 분산에 의한 펄스 폭의 확산을 반대 방향으로 보상함으로써 결과적으로 펄스 폭의 확산 없이 장거리로 광 펄스를 전송할 수 있는 광 전송 시스템이 솔리톤(soliton) 전송 시스템이다.

광 솔리톤 특성에 의한 펄스 전송 시스템은 1973년 Hasegawa⁴⁾ 등에 의해 그 이론적인 개념이 전개되어 그 실현 가능성이 예측되었으며 1983년 Gordon⁵⁾ 은 역산란 방식 (inverse scattering method) 를 적용하여 일반적인 솔리톤 포락선 관계식을 유도하였다. 광 솔리톤 전송시 문제되고 있

는 비선형 특성으로 인한 인접 솔리톤간의 상호 작용력에 대해 1987년 Mollenauer⁶⁾ 등은 인접한 근접 솔리톤간의 위상관계가 동상과 역상의 경우, 각각 흡인력 (attractive force) 과 반발력 (repulsive force) 이 있다는 것을 실험으로 확인하였으며 이와같은 상호 작용력으로 인해 비트 오류율이 증가됨을 발표하였다.

최근 이와같이 상호 작용력으로 인한 타이밍 지터 현상을 감소시키기 위해 광 위상 공액 장치 (optical phase conjugator) 등을 사용하여 효과적인 시스템을 구성하고 있지만^{7,8,9)} 본 논문에서는 별도의 부가 설비없이 최적의 비트 전송 속도를 위한 인접 솔리톤간의 최적 시간 간격값이 어떻게 주어지는가를 구하고자 하였다. 이를 위해 인접 솔리톤간의 자기 공분산계수를 구하고, 비상관 관계가 되는 인접 솔리톤간의 간격값에 의해 주어진 인접 솔리톤간의 시간 간격에 대해 신뢰도를 계산하여 90 % 이상의 신뢰도가 유지되기 위한 최대 전송 거리를 구하고자 한다.

II. 인접 솔리톤간의 신뢰도 계수 유도

일반적으로 무손실 경우의 솔리톤 전송 형태를 표현하고 있는 비선형 Schroedinger 방정식은 다

* : 연암공업전문대학 전자과

** : 경북대학교 전자전기공학부 전자계산소

접수일자 : 1995년 11월 22일

심사완료 : 1996년 1월 23일

음 식 (1)과 같이 주어진다¹⁰⁾.

$$-j \Phi_{\zeta} = \frac{1}{2} \Phi_{\tau} + |\Phi|^2 \Phi \quad (1)$$

여기서 Φ 와 ζ 및 τ 는 각각 기본 솔리톤의 진폭과 주기 거리 및 펄스 폭에 정규화된 무차원의 값으로 주어지며 기본 솔리톤 전력 P_s 와 솔리톤 펄스폭 τ_s 및 주기 거리 z_s 는 다음 식 (2)와 같이 주어지는 광 전송 재료 상수이다.

$$P_s = \frac{c_0 A_{eff} |k^*|}{n_2 \omega_0 t_s^2}, \text{ where } k^* = \left| \frac{\tau_s}{z_s} \right| \quad (2)$$

식 (2)에서 c_0 와 ω_0 는 진공중의 광속 및 솔리톤 캐리어의 주파수이며 A_{eff} 와 n_2 는 광섬유의 실효 단면적 및 비선형 굴절률이다. 또한 k^* 는 광섬유의 분산계수이며 이를 만족하는 솔리톤 포락선 Φ 의 방정식은 다음 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\Phi[\zeta, \tau] = \text{sech}[\tau] \exp[j\zeta/2] \quad (3)$$

그러므로 (3)식으로부터 초기 인접 솔리톤 위치의 선행 솔리톤 포락선을 $\Phi_s = \Phi[0, \tau + T]$, 후행 솔리톤 포락선을 $\Phi_r = \Phi[0, \tau - T]$ 라고 하였을 때 각각은 식 (1)의 비선형 Schroedinger 방정식을 만족하며 두 솔리톤의 시간 간격값 $2T$ 가 솔리톤 펄스 폭에 비해 매우 큰 값이라고 가정하면 인접 두 솔리톤은 비상관 관계가 되어 식 (1)의 비선형 방정식은 선형 시스템으로 근사화되므로 중첩의 정리가 성립된다고 볼 수 있다. 그러나 두 솔리톤의 시간 간격값 $2T$ 가 바로 인접하게 되면 각 솔리톤의 위상에 따라 포락선의 형태가 달라지게 되어 비선형 방정식인 (1)식을 만족하지 않으며 동시에 전송 거리에 따라 인접 솔리톤간 상호 작용력이 주어지게 된다.

이를 분석하기 위해 먼저 인접 두 솔리톤의 시간 간격값 $2T$ 가 솔리톤 펄스 폭에 비해 매우 큰 값이라고 가정하고 솔리톤 주기 거리 이내에서 주기적으로 광 증폭기가 설치되어 있다고 보면 인접 두 솔리톤의 진폭이 감쇄없이 동일한 선형 시스템으로 생각할 수 있다. 그러면 측정 구간 $2L$ 에서 식 (3)으로 주어지는 단일 솔리톤의 유한 구간 평균값 m_{2L} 을 계산해보면 식 (4)와 같이 주어진다¹¹⁾.

$$m_{2L} = \frac{2}{L} \tan^{-1} \left[\tanh \left[\frac{NL}{2} \right] \right] \quad (4)$$

여기서 N 은 솔리톤의 차수 (order)를 나타내는 값이며 초기에 인접한 광 솔리톤간의 즉, 선행 솔리톤 Φ_s 와 후행 솔리톤 Φ_r 사이의 자기 상관계수 (auto-correlation)를 계산하기 위해 측정 구간 $2L$ 이 두 솔리톤의 간격 $2T$ 보다 충분히 크다고 가정하면 즉, $L \gg T$ 이면 자기 상관 계수 r_{2L} 은

식 (5)와 같이 주어진다.

$$r_{2L} = \frac{N}{L} \text{csch} \left[2NT \ln \left[\frac{\cosh \left[\frac{N(L+T)}{2} \right]}{\cosh \left[\frac{N(L-T)}{2} \right]} \right] \right] \quad (5)$$

그리고 식 (5)에서 주어지는 측정 구간 $-L$ 과 $+L$ 사이의 유한 구간 평균값 m_{2L} 과 자기 상관 계수 r_{2L} 를 나타내는 식 (4)에 의해 인접 솔리톤의 상관도 (correlation)를 파악하기 위한 자기 공분산 계수 c_{2L} 와의 관계식은 식 (6)과 같이 주어진다.

$$c_{2L} = r_{2L} - m_{2L}^2 \quad (6)$$

여기 식 (5)와 (6)에서 인접 광 솔리톤 시간 간격 $2T$ 의 값이 증가될수록 자기 상관 계수 r_{2L} 과 자기 공분산 계수 c_{2L} 은 감소한다. 만약 $r_{2L} = 0$ 이 되면 직교 관계 (orthogonal), $c_{2L} = 0$ 이 되면 비상관 관계 (uncorrelation)가 되어 근접한 두 인접 솔리톤간의 상관도가 0이 되므로 상호 작용력의 영향력은 최소가 된다고 볼 수 있다. 또한 T 가 0인 경우 즉, 인접 솔리톤간의 간격이 0으로 중복되어 있는 경우를 기준으로하여 정규화된 자기 공분산 계수 c_{2L} 의 값을 구해보면 다음 식 (7)과 같이 된다.

$$c_{2L} = \frac{c_{2L}}{\frac{N}{L} \tanh[NL] - m_{2L}^2} \quad (7)$$

구체적으로 정규화된 자기 공분산 계수 c_{2L} 의 값이 0가 되는 조건 즉, 비상관 관계가 되는 솔리톤의 차수값 N 과 인접 솔리톤간의 반 시간 간격 T 값과의 상호 관계와 위치 및 범위를 파악하기 위해 영역 구분 그래프를 구해보면 다음 그림 1과 같이 주어진다.

그림 1로부터 정규화된 자기 공분산 계수의 값이 0가 되는 즉, 인접 솔리톤간 비상관 관계에 의해 상호 작용력이 무시되는 조건은 N 의 값이 증가함에 따라 T 의 값은 감소하는 반비례 곡선으로 거의 근사화되었다. 또한 $N=1$ 인 단위 솔리톤 전송 시스템의 경우에 초기 인접 솔리톤간의 시간 간격 $2T$ 의 값이 거의 6배의 값으로 관찰되어 솔리톤 펄스폭의 6배 정도 떨어져 있으면 상호 작용력으로 인한 비트 에러율 감소현상을 방지할 수 있음을 보여주고 있다.

그러나 그림 1의 결과는 측정 구간 L 에 따라 결과치가 약간 수정되는 종속성을 보여주고 있으므로 측정 구간 L 에 무관한 계수를 유도하여야 하며, 이상적으로 측정 구간 L 의 값이 ∞ 라고 할때 신뢰도 계수 S_0 를 다음의 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

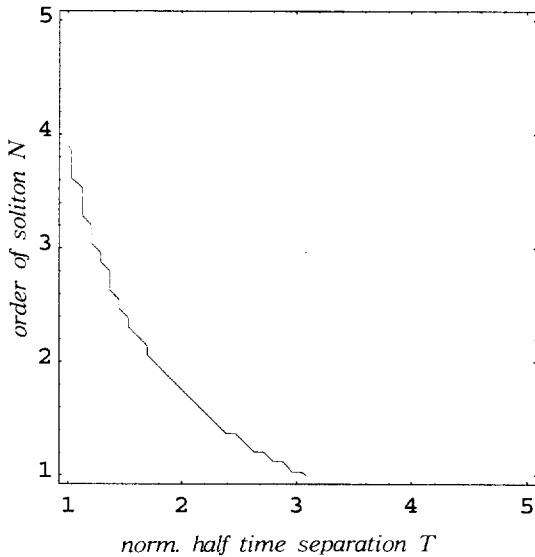


그림 1. 정규화된 자기 공분산 계수 $c_{210} = 0$ 가 되는 구분 그래프 ($L=100$)

Fig. 1. Distinguishing graph of normalized auto-covariance coefficient $c_{210}=0$ ($L=100$)

$$s_0 = 1 - c_0 \quad (8)$$

여기 식 (8)에서 c_0 값은 측정 구간 L 의 값이 ∞ 라고 할 때 (7)식의 정규화된 자기 공분산 계수 c_{210} 의 값으로 주어지며 측정 구간 L 의 값에 무관한 신뢰도 계수 s_0 의 값으로 주어진다. 주어진 신뢰도 계수 s_0 의 의미는 인접 솔리톤간의 반 시간 간격 T 가 0 일 때 즉, 인접 솔리톤이 중복되었을 때 상호 작용력이 가장 큰 값으로 주어지 정규화된 자기 공분산 계수 c_0 값이 1 이 되어 신뢰도 계수 s_0 가 0 이 되며, 반대로 인접 솔리톤간의 반 시간 간격 T 가 무한대가 될 때 즉, 단일 솔리톤으로 가정할때는 인접 솔리톤간의 상호 작용력이 주어지지 않음으로 c_0 값이 0 이 되면서 신뢰도 계수 s_0 가 1 이 되어 상호 작용력으로 인한 영향을 무시할 수 있다는 의미를 가지고 있다. 그러므로 신뢰도 계수 s_0 의 값은 인접 솔리톤간에 작용되는 상호 작용력을 측정할 수 있는 계수로 사용될 수 있으며, 인접 솔리톤간의 시간 간격값이 커지면 커질수록 신뢰도 계수 s_0 값은 점점 큰 값을 가진 계수로 식 (7)과 (8)로부터 다음 식 (9)와 같이 주어진다.

$$s_0 = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}, \quad x > 0 \quad (9)$$

식 (9)에서 $x=2NT$ 이며 솔리톤 차수값 N 과

인접 솔리톤간의 시간 간격 $2T$ 의 곱으로 주어지는 계수인 x 와 신뢰도 계수 s_0 의 상호 관계를 구하기 위해 로그 눈금의 그래프로 나타내면 다음 그림 2와 같이 주어진다.

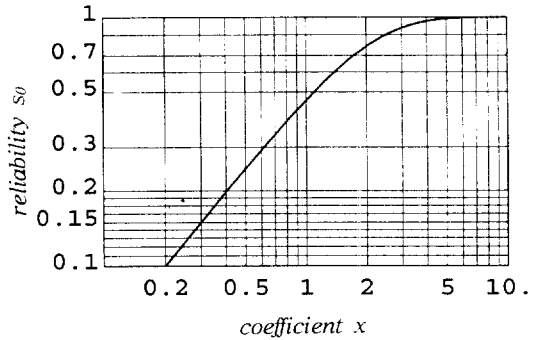


그림 2. 계수 x 값에 대한 신뢰도 s_0 의 로그 눈금 그래프

Fig. 2. Log. scale graph of reliability s_0 vs. coefficient x

그림 2에서 전체적으로 보면 $x=1$ 일 때 신뢰도 계수 s_0 의 값이 약 0.5 정도의 값을 가지고 있으며 $x=6$ 이상의 값에서 신뢰도 s_0 가 1 근방의 값을 가짐을 알 수 있다. 그러므로 기본 솔리톤 전송의 경우 인접 솔리톤의 시간 간격 값 $2T$ 의 값이 6 이상으로 광 솔리톤 펄스 폭의 6배 이상 멀어지면 신뢰도 계수 s_0 가 0.99의 값을 가지므로 초기에는 상호 작용력에 의한 비트 오차율을 무시할 수 있는 정도의 신뢰도를 가진 시스템이 된다는 의미를 가지고 있다. 그러나 그 이하인 경우 ($x < 6$)에는 상호 작용력에 의한 비트 에러율 상승이 초래되어 초기부터 불안정한 시스템이 된다.

III. 수치해석 결과 및 전송거리에 따른 검토

앞 절에서 구해진 식 (9)과 그림 2의 분석 결과는 솔리톤이 장거리로 전송되기전 초기 분석에 의한 결과이므로 상호 작용력에 의해 인접 솔리톤간의 시간 간격이 변경된다면 식 (9)의 초기 신뢰도가 전송 거리에 따라 변동되게 된다. 그러므로 Gordon 의 상호 작용력 방정식^[5]에 의해 전송 거리에 따른 신뢰도의 변동 정도를 파악해 보아야 한다. 그러면 무손실 전송 시스템 경우의 상호 작용력 방정식에 의해 전송 거리 z 에서의 신뢰도 s_2 는 다음 식 (10)과 같이 주어진다.

$$s_2 = \frac{1 - \exp[-\Delta_x]}{1 + \exp[-\Delta_x]}$$

$$\text{where } \Delta_x = x + \frac{1}{0.88} \ln[|f[\pi z e^{-0.88x}]|] \quad (10)$$

여기 식 (10)에서 Δ_x 는 솔리톤 전송 거리 z 에서의 인접 솔리톤간 시간 간격이며 함수 $f[\cdot]$ 는 인접 솔리톤간의 위상 관계가 동상인 경우 $\cos[\cdot]$ 으로, 역상인 경우엔 $\cosh[\cdot]$ 으로 주어진다. (10)식의 신뢰도 s_z 의 변화를 보면 인접 솔리톤간의 위상 관계가 동상인 경우, $\cos[\cdot]$ 에 의해 크게 진동됨을 알 수 있으며 역상인 경우는 단항적으로 서서히 증가됨을 예측할 수 있다. 또한 동상인 경우에는 인접 솔리톤간의 시간 간격값이 흡인력 형태의 상호 작용력으로 인해 증감을 반복하며 역상의 경우엔 반발력의 상호 작용력으로 서서히 멀어짐을 알 수 있다. (10)식에서 주어진 x 의 값은 기본 솔리톤의 경우이므로 인접 솔리톤간의 초기 시간 간격치와 동일하며, 솔리톤 전송 거리 z 를 0~100까지 변화시킬때 신뢰도 s_z 변화가 크게 이뤄지는 경우로 인접 솔리톤의 위상 관계가 동상인 경우의 신뢰도 s_z 변화를 90% 이상의 값에 대해 수치 해석을 통한 밀도 분포도를 구해보면 그림 3과 같이 주어진다. 식 (10)에 의해 주어진 그림 3의 수치 해석 결과는 인접 솔리톤간의 시간 간격 x 값을 0.1 단계로, 정규화된 솔리톤 전송거리 Z 의 값은 1의 단계로 하였으며 신뢰도의 분포도는 1%로 구분하여 명암을 표시하였다. 또한 신뢰도가 큰 값은 백색으로 작은 값은 흑색으로 표현하였다.

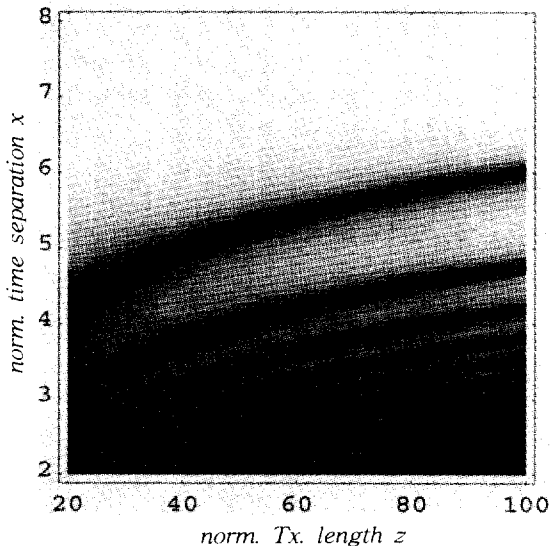


그림 3. 전송거리 z 에 대한 신뢰도 s_z 의 변화 ($s_z > 0.9$)

Fig. 3. Variation of reliability s_z vs. transmission length z ($s_z > 0.9$)

초기 충돌 거리를 최대 전송 거리로 하여 초기 설계 조건으로 인접 솔리톤간의 초기 시간 간격치를 솔리톤 펄스폭의 5배로 하였을 때 초기의 신뢰도는 약 95%로 주어지며 신뢰도가 크게 변화되는 동상의 경우, 솔리톤 주기 거리의 약 38배 이내의 전송 거리에서 신뢰도의 변화가 90% 이내로 유지하고 있음을 알 수 있다. 그러나 초기 설계 조건을 인접 솔리톤간의 초기 시간 간격치를 솔리톤 펄스폭의 6배로 하였을 때 초기의 신뢰도는 약 99%로 주어지며 신뢰도가 크게 변화되는 동상의 경우, 솔리톤 주기 거리의 약 93배의 전송 거리까지 신뢰도의 변화가 90% 이내로 유지되고 있음이 확인되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광 솔리톤 전송 시스템에 있어서 근접한 인접 솔리톤 상호간의 상호 작용력에 대한 신뢰도 및 최대 전송 거리의 변화 특성을 분석하고자 하였다. 솔리톤 전송 시스템의 비트 전송 속도를 결정짓는 인접 광 솔리톤 펄스간의 최적 시간 간격치를 결정하기 위해 무손실의 경우로 한정하고, 인접 솔리톤간의 자기 공분산 계수를 유도하여 비 상관 관계가 되는 조건을 분석하였으며, 정밀한 결과를 구하기 위해 상호 작용력에 의한 영향으로부터 벗어날 수 있는 정도를 나타내는 신뢰도 계수를 정의하고 수식에 의해 유도, 분석하였다. 그 결과, 단위 솔리톤 피크 진폭이 대해 대략 인접 솔리톤 펄스간의 초기의 전송 시간 간격이 솔리톤 펄스 폭의 6배 이상 유지하고 있으면 초기 신뢰도가 99% 이상으로 인접 광 솔리톤간에 비 상관 관계가 되어 상호 작용력이 무시될 수 있는 조건임을 알 수 있었으며 90% 이상의 신뢰도를 가지기 위해서는 최대 전송 거리가 솔리톤 펄스 주기 거리의 93배 이내의 거리로 주어짐을 알 수 있었다. 차후 실제 저 손실 전송 시스템의 경우 인접 솔리톤간 피크치 변화와 함께 증폭기에서 발생하는 잡음의 영향에 대한 연구도 병행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill, pp. 48-79, 1983.
2. J. Gowar, *Optical Communication System*, Prentice-Hall, pp. 71-89, 1984.
3. P.Cheo, *Fiber Optics and Optoelectronics*,

- Prentice-Hall, pp. 73-100, 1990.
4. A. Hasegawa and F. Tappert, "Transmission of Stationary Optical Pulses in Dispersive Dielectric Fibers," *App. Phys. Lett.*, Vol. 23, No. 3, pp. 142-144, Aug., 1973.
 5. J. P. Gordon, "Interaction Forces Among Solitons in Optical Fibers," *Opt. Lett.*, Vol. 8, No. 11, pp. 596-598, Nov., 1983.
 6. F. M. Mitschke and L. F. Mollenauer, "Experiment Observation of interaction Forces Between Solitons in Optical Fibers," *Opt. Lett.*, Vol. 12, No. 5, pp. 355-357, May, 1987.
 7. D. Anderson and M. Lisak, "Bandwidth Limits Due to Mutual Pulse Interaction in Optical Soliton Communication Systems," *Opt. Lett.*, Vol. 11, No. 3, pp. 174-176, Mar. 1986.
 8. W. Folsysiak, K. J. Blow, and N. J. Doran, "Reduction of Gordon-Haus Jitter by Post - Transmission Dispersion Compensation," *Elect. Lett.*, Vol. 29, No. 6, pp. 1225-1226, Nov. 1993.
 9. A. Yariv, D. Feket, and D. M. Pepper, "Compensation for Channel Dispersion by Nonlinear Optical Phase Conjugation," *Opt. Lett.*, Vol. 4, No. 3, pp. 52-54, Mar. 1979.
 10. N. J. Doran and W. Folsysiak, "Reduction of Gordon-Haus Jitter in Soliton Transmission Systems by Optical Phase Conjugation," *IEEE J. Light. Technology*, Vol. 13, No. 5, pp. 850-855, May. 1995.
 11. P. Z. Peebles, Jr., *Probability Random Variables, and Random Signal Processing*, McGraw-Hill, pp. 142-171, 1987.

저자소개



변승우
1958년 9월 20일생. 1980년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1983년 2월 동대학교 대학원 졸업(석사). 1991년 2월 동대학교 대학원 박사과정 수료. 1995년 4월 - 현재 연암공업전문대학 전자과 교수.



김종규
1956년생. 1978년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1980년 2월 경북대학교 대학원(석사). 1995년 2월 경상대학교 대학원(박사수료). 1983년 1월-84년 12월 금성전기연구소 연구원. 1985년-현재 연암공업전문대학 전자과 부교수.



송재원
1955년생. 1978년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1980년 2월 한국과학기술원 전기공학과(석사). 1984년 2월 한국과학기술원 전기공학과(공학). 1984년 3월-현재 경북대학교 전자전기공학부 교수. 1994년 1월-현재 경북대학교 전자계산소 소장.