

뉴로-퍼지 알고리즘을 적용한 광파이버 유도 브릴루앙 산란 센서에 관한 연구

황경준 · 엄경태 · 김관규 · 송연신 · 왕설 · 김용갑*
원광대학교 공과대학 전자재료학과

Implementation of stimulated Brillouin scattering in Optical Fiber Sensor by using Neuro-Fuzzy Theory

K.J. Hwang · K.T. Yeoum · K.K. Kim · Y.X. Song · X Wang · Y.K. Kim*
Dept. Electronic Materials Engineering, University of Wonkwang

Abstract - 본 논문은 1310nm 단일모드 광섬유를 이용하여 온도센서로 활용하기 위한 연구이다. 기존광섬유센서의 연구는 복잡한 여러 가지 기기를 이용하여 구성된 시스템이었다. 그리고 산란 변화를 주기 위하여 Bragg 격자나 Pulse generator를 이용하여 광주파수의 변화를 측정하거나, YAG 레이저를 이용 벌크형 시스템을 택하여 구성하였는데 실험 환경을 구성하는 어려움과 측정된 데이터의 정확도에 대한 문제점이 있었다. 본 연구에서 제안한 유도 브릴루앙 산란(sBs: stimulated Brillouin scattering)광을 이용한 온도센서 시스템은 기존의 측정방식 보다 간소화된 직렬방식의 시스템이다. 광주파수에서 발생하는 노이즈와 애매한 결과에 대해서 신뢰성과 정확도를 확보하기 위하여 지능형인 뉴로-퍼지 알고리즘을 이용하여 분석함으로써 기존 시스템 보다 정확한 데이터를 얻고자 하였다. 본 연구에서 sBs는 빛의 산란 특성 중 광주파수가 온도에 변화에 대해 각각의 온도 변화당 천이가 이루어졌음을 측정하였다. 시스템에서 출력된 데이터를 뉴로-퍼지로 분석한 변화율은 1.1MHz/의 결과를 얻었다.

1. 서 론

광섬유에 유도되는 비선형 광학 현상들 중 하나인 유도 브릴루앙 산란 (Stimulated Brillouin Scattering; SBS)은 고체, 액체, 기체, 그리고 플라즈마 상태에서 광범위하게 관찰된다. 특히, 1990년대에 들어서면서 광섬유에서 나타나는 SBS가 주목을 받기 시작하면서 많은 연구가 이루어졌다[1,2]. sBs 현상은 매질의 phonon과 빛의 상호작용에 의해 입사광이 산란되는 현상으로, 산란광, 신호광, phonon의 위상정합조건에 의해서 신호광이 진행하는 방향과 반대 방향으로 산란이 가장 잘 일어난다. 일단 입사되는 빛의 출력이 SBS가 일어나기 위한 문턱 값을 넘을 때 지수적으로 증가하고, SBS는 고출력으로 갈수록 상당한 손실을 초래하게 된다[3,4]. 만약 SBS로 인한 손실을 효과적으로 제어할 수만 있다면, 광섬유에서 시스템이 간단한 광센서로 활용 할 수 있을 것이다. 기존광섬유센서의 연구는 복잡한 여러 가지 기기를 이용하여 구성된 시스템이었다. 그리고 산란 변화를 주기 위하여 Bragg 격자나 Pulse generator를 이용하여 광주파수의 변화를 측정하거나, YAG 레이저를 이용 벌크형 시스템을 택하여 구성하였는데 실험 환경을 구성하는 어려움과 측정된 데이터의 정확도에 대한 문제점이 있었다[5,6]. 브릴루앙 산란은 이러한 특성으로 인하여 광섬유를 이용하는 광통신과 광센서의 여러 응용분야에서 연구의 대상으로 주목 받고 있다. 특히 광섬유의 위치에 따라 달라지는 온도, 압력, 스트레인 등을 실시간으로 측정할 수 있는 연구가 점진적으로 진행되고 있다[7,8,9]. 광섬유 내의 브릴루앙 산란을 이용하여 광섬유의 길이에 따른 물리적 정보를 측정하는 광섬유 센서 기술로는 OTDR(Optical time domain reflectometry)[10]과 OTDA(Optical time domain analysis)[8]등이 보편적으로 사용되는데, 이들 방식에서는 유도 브릴루앙 산란을 이용하여 광섬유의 길이에 따른 온도, 압력, 스트레인 변화 등의 물리적 정보를 측정할 수 있다. 이는 장거리에 걸쳐 측정이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 이러한 시스템에서 측정된 데이터를 뉴로-퍼지를 이용하여 분석하면 보다 정확성을 높일 수 있어 센서로서의 안정된 데이터를 검출 할 수 있을 것이다.

2. 본 론

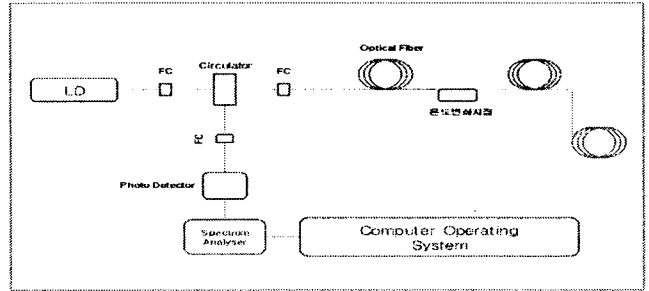
2.1 뉴로-퍼지를 이용한 sBs 광섬유센서

본 연구에서 제안한 sBs광을 이용한 온도센서 시스템은 기존의 측정방식 보다 간소화된 직렬방식의 시스템이다. 광주파수에서 발생하는 노이즈와 애매한 결과에 대해서 신뢰성과 정확도를 확보하기 위하여 지능형인 뉴로-퍼지 알고리즘을 이용하여 분석함으로써 기존 시스템 보다 정확한 데이터를 얻고자 하였다.

2.1.1 광섬유센서를 이용한 실험

본 연구에서 구축한 OF 센서 시스템으로 온도에 변화에 대한 테스트를 할 것이다. 실험에 대해 설명하면 다음과 같다. 측정 분석 실험환경은 외부 온도변화에 대한 영향을 줄이고 데이터의 정확성을 기하기 위하여 실내온도 상온 20℃인 실험실에서 실험하였다. 광원은 연속광 레이저 중 장파장의 중거리 레이저소스(1310nm)를 사용 하였고, 실험재료는 LiteSpec G Zeaq2 40km의 일반 광 측정용으로 쓰이고 있는 단일모드(SM: single mode) 광파이버를 사용하였다. 또한 실험 중 환경변화를 감안하여 항온/항습 챔버를

이용하여 일정한 시간적인 간격과 일정한 주기를 주어 정확성을 높였다. 온도는 25℃~69℃의 변화를 주고 시간에 대한 환경변화를 고려 1℃ 당 30분의 간격을 두었다. 그 이유는 온도변화에 따른 온도 변화차를 고려하여 시간의 간격을 충분히 유지 하였다. 그 결과 온도변화에 대한 실험 결과치의 오차변화 분은 무시하기로 했다. 실측된 유도 브릴루앙 산란이 측정되어 온도의 의해 변화가 되는 표1은 실험데이터 밑에 각 구간별 변화율로 도표화 하였다. 그림1은 실험을 구성하기 위하여 나온 시스템 도이다. 광섬유 온도센서 시스템에서 루프 광센서방식이 아닌 직선형 광센서방식을 이용하였다.



<그림 2> 광섬유센서시스템

본 실험에서 직선형 광센서 방식을 설명하면 다음과 같다. 직선형 광센서 방식.

$G_B P_0^{\sigma} L_{eff} / A_{eff} \approx 21$
측정에 있어서 가장 중요한 것은 센서의 장점을 위한 좁은 선폭, 잠음제로, 그리고 컴퓨터 논리인 "0"와 "1" 값처럼 정확하게 실측하였다. 아래의 식은 광파이버센서의 구성 장치도에 따라 측정 오차가 다음을 보여주는 수식과 실제 실험 셋업 장치이다. 실험방법에 따라 변화가 큰 것을 알 수 있는데 본 실험은 광센서 직선형센서 방식에 따라 테스트 하였다.[10]

브릴루앙 천이는 $\Omega_B = 4\pi n(v_A/\lambda_p) = 2\pi\nu_B$ 이고, 여기서 는 광섬유 내에서 음파의 속도이다. SBS 과정은 다음과 같은 네 개의 비선형 방정식에 따른다.

$$\frac{\partial E_p^-}{\partial z} + \frac{1}{v_q} \frac{\partial E_p^-}{\partial t} = -q_B E_S^- Q + i\Gamma(|E_p^-|^2 + 2|E_S^+|^2 + 2|E_S^-|^2)E_p^-$$

$$-\frac{\partial E_S^-}{\partial z} + \frac{1}{v_q} \frac{\partial E_S^-}{\partial t} =$$

$$q_B E_p^- Q^* + i\delta E_S^- + ik^* E_S^+ + i\Gamma(|E_S^-|^2 + 2|E_p^-|^2 + 2|E_S^+|^2)E_S^-$$

$$-\frac{\partial E_S^+}{\partial z} + \frac{1}{v_q} \frac{\partial E_S^+}{\partial t} = i\delta E_S^+ + ik E_S^- + i\Gamma(|E_S^+|^2 + 2|E_p^-|^2 + 2|E_S^-|^2)E_S^+$$

$$\tau_A \frac{\partial Q}{\partial t} + Q = E_p^- E_S^* + Q_0,$$

여기서 군속도 $V_q = c/\bar{n}$ 는 군속도이고, 결합계수 k, 비선형 파라미터 Γ 그리고 detuning파라미터 δ 는 다음과 같이 정의된다.

$$k(z) = \frac{\pi n_1}{\lambda}, \Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_2, \delta = k_s - k_B,$$

광자-음자(phonon)결합 $Q_B^e = \tau_A q_1 q_2$ 계수에 의해 지배되며, 여기서 n_0 는 코어 굴절률, ρ_0 평균 밀도, $F_{12} = 0.286$ 은 실리카 광섬유의 탄성-광학계수, τ_A 는 음자 수명, $Q = \rho/(iq_s \tau_A)$ 는 음파의 정규화 된 진폭, 그리고 $Q_0 = f(z,t)/(iq_2)$ 는 SBS를 이끄는 열 변동을 표시한다[11-13].

다음과 같이 sBs가 측정될 수 있도록 정의하여 실험구성을 하였다. 본 실험에서 얻은 결과를 보여주고 있다.

2.2 뉴로-퍼지 알고리즘으로 분석

측정데이터의 신뢰도와 정확도를 높이기 위해서 뉴로-퍼지 시스템을 적용하였다. 비선형 시스템에 대해서 언어적으로 규칙을 서술할 수 있고, 그에 따른 퍼지수가 정의된다면 그 언어적인 규칙에 근거해 비선형 시스템도 모델링이 가능한 것이다. 이렇게 구해진 퍼지 모델을 통해서 어떠한 입력이라도 넣어주면 결과를 얻을 수 있다. 이 과정이 추론(reasoning 또는 inference)이다. 퍼지 추론은 크게 직렬법과 간접법으로 구별할 수 있다.

본 논문에서는 비선형 시스템 모델 및 제어에 유용한 직접법을 이용하였다[14,17]. 이러한 퍼지관계를 보다 지능적으로 처리 할 수 있게 인간의 뇌 신경과도 같은 뉴런에 접근하여 뉴로-퍼지를 알고리즘으로 적용을 시켰다.

$$y = f(\sum_{k=1}^n x_k w_k + b)$$

여기서 x_k 는 입력 벡터이고 w_k 는 뉴런들에 입력을 연결하는 b가중치이고, 는 임계값을 나타낸다. 보통 이러한 함수는 연속성을 가지며, 단조 증가하는 형태를 가진다. 곱의 결과인 $d_k = x_k w_k$ 는 뉴런에 대한 나뭇가지 모양의 입력이라 할 수 있다.

퍼지 뉴런의 경우에 이러한 나뭇가지 모양의 입력은 입력과 가중값의 함수가 된다. 이러한 확률적 합과 같은 S-노움 또는 적(product)과 같은 T-노움이 될 수 있다. 함수의 선택은 사용될 퍼지 뉴런의 형태 중속된다[15].

S-노움 : (1) 확률적합 : $d_k = x_k S w_k = x_k + w_k - x_k w_k$

(2) OR : $d_k = x_k S w_k = x_k \vee w_k = \max(x_k, w_k)$

T-노움 : (1) 적 : $d_k = x_k T w_k = x_k \cdot w_k$

(2) AND : $d_k = x_k T w_k = x_k \wedge w_k = \min(x_k, w_k)$

나뭇가지 형태의 입력은 어떤 선택된 연산자를 사용하여 통합 되어 진다. 가장 간단한 형태로서 이러한 연산자는 가산 연산자이지만, min과 max와 같은 다른 연산자들도 공통적으로 사용된다.

가산 통합 연산자: $I_k = \sum_{n=1}^n d_k$

min 통합 연산자: $I_k = \wedge_{k=1}^n d_k = \min(d_k)$

max 통합 연산자: $I_k = \vee_{k=1}^n d_k = \max(d_k)$

퍼지 뉴런 출력 z_k 는 내부 활동 I_k 와 뉴런의 임계 수준의 함수이다. 이러한 함수는 수치적인 것일 수도 있고, T-노움 또는 S-노움 일 수도 있다.

$$z_k = \phi(I_k, I_{k,0})$$

퍼지 뉴런에서 상이한 연산자들의 사용은 뉴런이 여러 가지 기능들을 가질 수 있도록 한다. 예컨대 하나의 퍼지 뉴런의 출력이 "작음" 또는 "빠름"과 같은 입력 벡터의 언어적인 표현이 될 수도 있다. 이러한 언어적인 표현은 퍼지 뉴런들의 다음 층에 의해 처리되어서 특정 관계를 모형으로 나타낼 수 있도록 한다[15,16]. 이를 기초로 하여 임계값은 내부 활동에 전파되고, 활동함수 연산자에 따라서 뉴런 출력에 영향을 미치게 된다. 활동함수 또는 전달함수는 내부 활동으로부터 뉴런 출력으로서의 사영 연산자라 할 수 있다. 이러한 사영은 하나의 언어적 변형자에 대응된다. 예컨대 입력이 수행 등급으로 가중되는 경우에 언어적인 변형자 more-or-less는 통합된 값을 보다 강하게 한다. S-노움과 T-노움이 보통 사용된다. 하나의 S-노움 통합과 하나의 T-노움 전달함수를 수행한다. 가장 보편적으로 사용되는 퍼지 뉴런은 AND 와 OR 뉴런이다. AND 뉴런은 나뭇가지 모양의 입력과 가중치 상에서 S-노움 연산의 적용 결과에 관해 T-노움 연산들이 수행될 수 있지만, 보통 max와 min 연산자들이 사용된다.

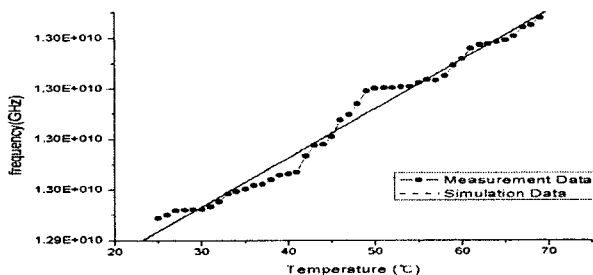
AND 뉴런 표현은 다음 식과 같다.

$$z_k = T_{i=1}^n (x_i S w_{ki})$$

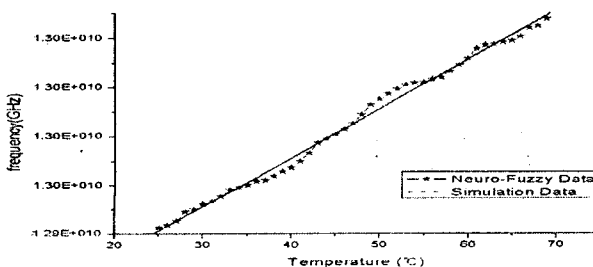
OR 뉴런은 나뭇가지 모양의 입력과 가중치 상에서 T-노움 연산을 수행하고 나서 T-노움 연산의 출력 결과에 S-노움 연산을 수행한다. 즉

$$z_k = S_{i=1}^n (x_i T w_{ki})$$

AND 와 OR 뉴런들은 층들에 배열될 수 있고, 이러한 층들은 다층 퍼지 신경망의 형성을 위한 네트워크로 배열될 수 있다. 뉴로-퍼지 시스템에서 분석한 결과이다.



〈그림 2〉 광섬유센서시스템측정 온도변화와 시뮬레이션



〈그림 3〉 뉴로-퍼지로 분석한 온도변화와 시뮬레이션

3. 결 론

그림2는 측정된 데이터를 활용하여 각각의 온도변화에 따른 변화를 그래프로 분석하였다. 제안된 시스템에서 측정된 데이터와 측정프로그램에서 출력된 주파수의 차이가 일어남을 알 수 있다.

SBS 측정프로그램으로 온도변화에 대한 주파수가 차이가 발생한 그래프를 출력한 것이다. 이러한 그래프에서 나타난 주파수를 정량적으로 표1에서와 같이 나타내었다. 이러한 데이터를 얻기 위하여 수 차례 반복적으로 실험을 하여 데이터에 대한 룰 높였다. 오차범위에 대한 신뢰도를 향상하는데 온도 간격을 30분으로 진행하였고, 고분해능을 얻기 위하여 똑같은 온도에서 컴퓨터 연산처리를 거쳐 범위 변화에 대한 오차를 1.1MHz까지 축소 할 수 있었다. 그림3은 측정시스템에서 얻어진 결과를 뉴로-퍼지로 분석하여 얻어진 결과이다. 이는 연결하는 프로그램에서 연산처리를 거친 데이터 결과로써 분석이 향상되었음을 증명하였다. 주파수 차이가 일어나고, 온도가 낮아질수록 원점으로 돌아온다는 사실을 알 수 있었다. 이는 길이 40Km에서 12.94867000Hz~13.27830000Hz의 주파수 범위를 갖는 온도변화에 대한 주파수 차이이다. 계속적인 실험을 위하여 기존 입력과위보다 고출력의 레이저를 사용하면 더 안정된 시스템으로 자리를 잡을 것으로 판단된다. 그리고 본 논문에서 제시한 시스템을 이용하면 기존 적선형 방식보다 시스템을 간소화하고, 컴퓨터 프로그램으로 진단이 가능하여 비 전문가도 사용이 가능하기 때문에 보편하게 사용 할 수 있을 것이다.

[감사의 글]

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업(I-2004-0-074-0-00)에 의해 작성되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] R. G. Harrison, J. S. Uppal, A. Johnstone, and J. V. Moloney, "Evidence of chaotic stimulated Brillouin scattering in optical fibers", Phys. Rev. Lett. 65, 167, 1990.
- [2] C. C. Chow and A. Bers, "Dynamical analysis of Brillouin fiber lasers: An experimental approach", Phys. Rev. A 47, 5144, 1993.
- [3] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 3rd ed. Wiley-Interscience, New York, 2002.
- [4] 김향균, 이창희, 한정희, "광섬유에 유도되는 stimulated Brillouin scattering 현상이 광전송 시스템에 미치는 영향 측정 및 제거", The Journal of Optical Society of Korea, Vol 7, Number 1, March. 1996.
- [5] 이현욱, 송민호, 이준호, "광섬유격자 온도센서의 정밀도 개선", 한국광학회, Vol 17, Num 3. June. 2006.
- [6] 윤승철, 서민성, 박희갑, "공간 선택적 브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서의 시뮬레이션" 한국광학회, Vol17, Num 2, April. 2006.
- [7] D. Culverhouse, F. Farahi, C.N. Pannell, D.A. Jackson, "Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism of distributed temperature sensor", Electron. Lett. 25, 913 (1989).
- [8] X. Bao, D.J. Webb, D.A. Jackson, "22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber", Opt. Lett. 18, 552 (1993).
- [9] V. Lecoecuche, D.J. Webb, C.N. Pannell, D.A. Jackson, "A simple and efficient technique for an offset frequency shifter for Brillouin based distributed fiber sensing", Proceedings of OFS, p. 332 (1997).
- [10] T.horiguchi, T. Kurachima, and M.Tateda, "Tensile strain dependence of Brillouin Frequency shift in silica optical fibers", IEEE Phonton. Technol. Lett., vol. 1, no. 5, pp. 107-108,1989.
- [11] A. HÖök and A. Bolle, "Transient dynamics of stimulated Brillouin scattering in optical communication systems", J.Lightwave Technol., vol. 10, pp. 493-502, 1992.
- [12] 이호준, "샘플링 광섬유 Bragg 격자를 이용한 광섬유 내의 유도 Brillouin 산란 억제" Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 16, Number 6, pp. 485-489, December 2005
- [13] Seunggho Go*, Hojwn Lee*, Kisoo Kim* "ILFE Sensor using Laser Chirp and Arc-tangent Algorithm" P1.4, CLEO, Pacific Rim'99, pp. 328-329
- [14] C.C.Lee, "Fuzzy logic in control systems : Fuzzy logic controller-part I" IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.20(2),pp.404-418,1990.
- [15] T. Tokagi, "Introduction of fuzzy systems, neural networks, and genetic algorithms," Intelligent Algorithms: Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms, D. Ruan(eds.), Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [16] A.S. Basu, S.K. Majumdar, K.L, "Robust classification of multispectral data using multiple neural networks and fuzzy integral", Kumar, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on On page(s): 787-790, Volume: 35, Issue: 3, May 1997.
- [17] Yong K. Kim, et.al, "Transient Control of SBS Chaotic Instability in Optical Fiber Communication Systems", SCI-2004 Pro. Vol. 6, pp.366-369, Orlando Florida USA, July 2004.