

퍼지 PI제어를 이용한 광섬유형 ESPI의 위상 안정화

(Phase stabilization of fiber optic ESPI using Fuzzy PI controller)

박형준* · 송민호

(Hyoung-jun Park · Minho Song)

전북대학교 전자정보공학부

Abstract

We propose a phase stabilisation and control system for the use in fiber-optic ESPI. The fast phase stabilisation against environmental perturbations has been achieved by using Fuzzy PI control. Combined with closed-loop switching, the system showed accurate and fast $\pi/2$ phase stepping capability.

1. 서 론

넓은 영역의 미소변위나 진동 모드의 실시간 계측을 위해서 공간적 분해능이 높은 레이저 간섭법이 많이 사용된다.[1],[2] 레이저 간섭법은 측정 대상과 계측환경에 따라서 크게 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)와 shearography 등으로 나눌 수 있다. 또한 사용하는 광소자의 형태에 따라 광섬유(fiber-optic)형과 벌크(bluk)형으로 나뉘어 진다. 벌크형이 시스템의 부피가 커지고, 광손실이 큰 단점이 있는 반면에, 광섬유형은 정렬하기 쉽고, 크기가 작고 가벼워서 휴대가 가능하게 시스템을 제작하기 용이하고, 광손실이 적은 장점을 가진다.[3],[4],[5] 그러나, 광섬유 시스템은 환경적인 변화 즉, 온도나 진동과 같은 외란에 따른 간섭계의 출력 변화가 커서 현장적용에 어려움을 겪는 경우가 많다. 본 논문에서는 퍼지 PI(Fuzzy Proportional - Integral) 제어를 사용하여 환경적 영향에 따른 위상변화를 안정화시키고 간섭신호에 정확한 위상변이를 가할 수 있는 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2-1. 레이저 간섭계

그림 1은 광섬유형 레이저 간섭계 시스템의 구성도이다. 레이저의 광출력은 50:50의 분리비율을 갖는 광분할기에 의해서 기준광과 대상체에 조사되는 광으로 나뉘

다. 측정대상체에서 반사된 빛은 기준광과 간섭하여 CCD 촬상소자에서 간섭패턴을 발생하며 위상변조기를 사용하여 패턴간의 위상차를 $\pi/2$ 가 되도록 조절할 경우 위상추출 알고리즘을 이용하여 측정대상체의 표면정보를 담고 있는 간섭신호의 위상정보를 추출할 수 있다. 간섭신호의 위상변조는 광섬유 마이켈슨 간섭계의 한쪽 팔에 원통형의 PZT(Piezoelectric Transducer)를 감고 증폭된 제어신호를 PZT에 가하여 이루어진 PZT의 비선형성 오차와 환경적인 온도, 진동 등의 영향등은 피드백 제어를 통해 극복하고자 하였다.

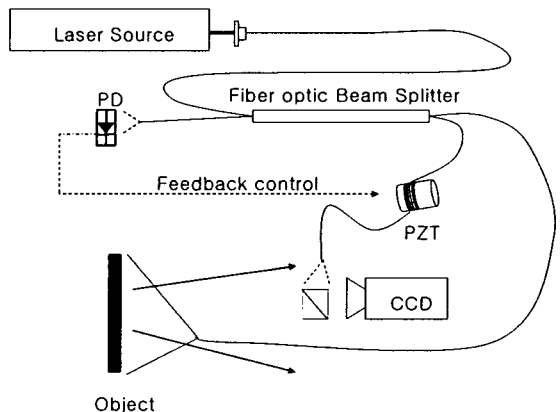


그림 1. 레이저 간섭계 구성도

2-2. 위상 변형의 추출

CCD 카메라를 이용하여 얻은 간섭패턴에서 각 픽셀의 출력은 간섭이론으로부터 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$I_i = I_{0i}[1 + V_i \cos(\delta\phi + \phi_{ri})] \quad (1)$$

(I_{0i} : DC, V_i : 입사광원의 가시도, $\delta\phi$: 위상차, ϕ_{ri} : 기준 파형의 위상)

$\delta\phi$ 는 측정대상체의 표면정보를 가지는 위상성분이며 ϕ_{ri} 는 기준 광신호와 대상체에 조사되는 광신호 간의 위상차를 나타낸다. 식(1)과 같이 CCD 출력은 코사인 함수 형태이므로 표면 정보에 해당하는 간섭신호의 위상을 얻기 위해서는 위상제어를 통한 위상추출과정이 필요하다.

위상정보를 추출하기 위한 많은 알고리즘이 있으며, 본 논문에서는 기준위상을 조절하여 얻은 4개의 간섭패턴을 연산하여 위상을 얻는 기술을 사용하였다. 위상 변조 장치인 PZT를 사용하여 기준 위상 ϕ_{ri} 를 변화시킬 수 있는데, $\pi/2$ 의 배수에 해당하는 위상변조를 가하면서 4개의 간섭패턴을 얻으면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} I_1 = I_0[1 + V \cos(\delta\phi)] \\ I_2 = I_0[1 - V \sin(\delta\phi)] \\ I_3 = I_0[1 - V \cos(\delta\phi)] \\ I_4 = I_0[1 + V \sin(\delta\phi)] \end{cases} \quad (2)$$

4개의 간섭출력을 아래의 연산과정에 대입하여 위상값을 추출하게 된다.

$$\delta\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (3)$$

2-3. 위상 안정화

그림 2는 광섬유형 ESPI의 위상제어 시스템의 개략도이다. 레이저 다이오드의 출력은 2x2 광섬유 커플러를 통해 대상체에 조사되는 광신호와 기준 광신호로 나뉘며, 각각의 광섬유 끝단에서는 공

기와 광섬유의 굴절율차에 따라 약 4%의 광신호가 반사된다. 반사된 광신호는 동일한 경로를 왕복한후 PD에서 신호를 발생시키며, PD출력의 위상 Φ_C 는 CCD 카메라에서 간섭하는 광신호의 위상 Φ_L 의 2배가 되어 $\Phi_C = 2\Phi_L$ 가 성립한다.

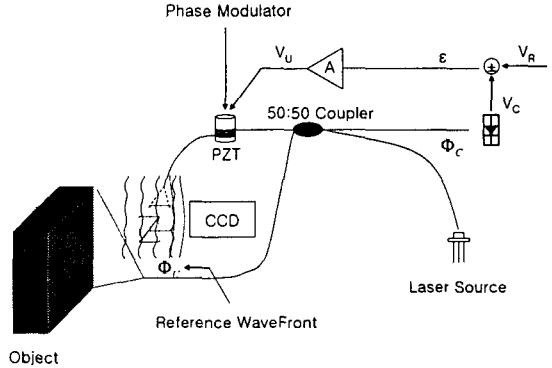


그림 2 광섬유형 ESPI의 위상제어 개략도

따라서, 피드백 서보 제어를 통해서 Φ_C 를 안정화 시킴으로써, CCD 카메라에서의 간섭 위상 Φ_L 를 안정화시킬 수 있다.

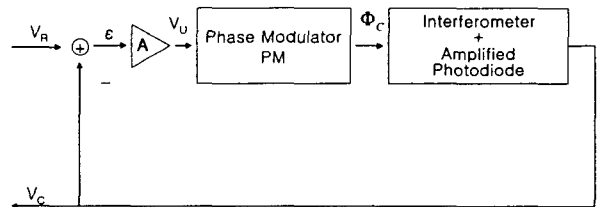


그림 3. 위상 안정화 제어 장치의 블록 다이어그램

그림 3은 P제어를 이용한 PD출력 위상 안정화 제어장치의 블록 다이어그램이며 PD에서의 간섭신호를 식 (4)와 같이 표현하였다.

$$V_C = V_{0C}[1 + \cos(\Phi_C)] \quad (4)$$

$$\Phi_C = \arccos\left(\frac{V_R}{V_{0C}} - 1\right) \quad (5)$$

식 (4)로부터 식 (5)를 얻을 수 있으며, $V_R = V_{0C}$ 를 만족하는 기준신호 V_R 를 선택함으로써, 간섭위상의 평균값은 식(6)과 같이 정해진다.

$$\Phi_C = \pm \frac{\pi}{2} + 2n\pi, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

따라서, 그림 4와 같이 PD에서 검출되는 간섭출력을 I_0 에 안정화시키고, 위상 Φ_c 를 π 만큼 연속해서 이동 시킨 4개의 CCD 출력을 연산하여 위상정보를 알 수 있다.

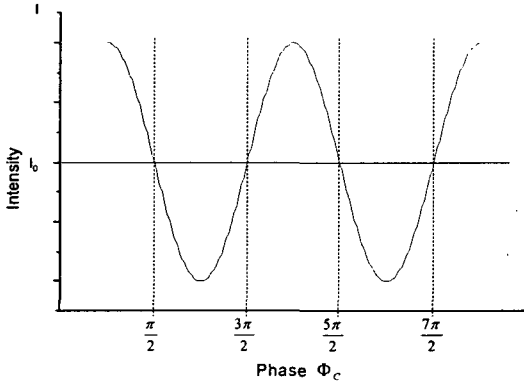


그림 4. 간섭계의 출력과 위상 Φ_c 의 관계

2-4. 퍼지 PI(Proportion-plus-Integral) 제어

일반적으로 비례제어를 이용하는 경우 목표값에 접근할수록 조작량이 작아져서 더 이상 미세하게 제어를 할 수 없게 된다. 시간이 지나도 목표값에는 가까워지지만, 원하는 출력값에 완전히 일치하지 않는 상태가 되며 이러한 미소 오차를 잔류편차(steady error)라고 한다. 이 잔류편차를 없애기 위해서 적분회로를 사용한 적분제어를 한다.

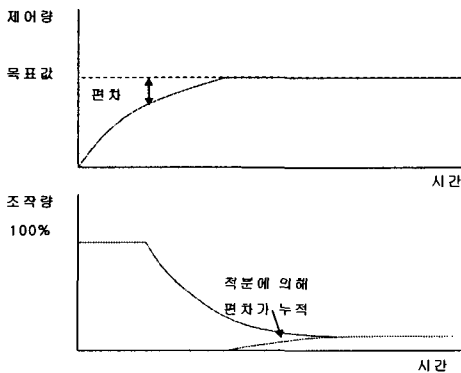


그림 5. PI(Proportion-plus-Integral) 제어

그림 5와 같이 PI 제어기는 미소 잔류편차를 시간적으로 누적 제어량을 증가시켜서 잔류편차를 없애는 방식

으로 동작하며, 비례제어기에 적분제어기를 포함한 제어기를 PI제어기라고 한다. PI 제어기는 선형시스템에서는 효과적이거나, 비선형이거나 지연시간이 큰 시스템, 고차계수의 시스템에서는 적절하게 작동하지 않는다. 퍼지 논리를 기반으로 한 PI 제어기는 모델기반이 없이도 설계가 가능하고 선형시스템뿐만 아니라, 비선형이거나, 지연시간이 큰 시스템에서도 견실하게 작동한다.[6],[7],[8]

본 논문에서 마이켈슨 간섭계의 출력은 코사인 파형이므로 출력파형이 증가하는 경우는 PI 제어가 빠르게 목표값에 수렴하는게 가능하지만, 감소하는 경우에는 부호가 반대로 되어서 위상이동이 일어나기 전까지는 PI 제어가 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 퍼지 논리를 추가한 PI 제어로 시스템의 비선형성을 극복하고 마이켈슨 간섭계의 미소위상 조절을 가능하게 하였다.

2-5. 위상 안정화 제어 실험

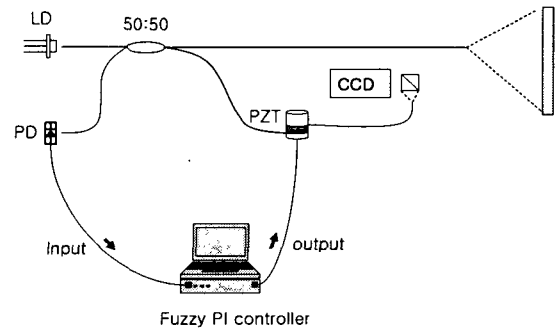


그림 6. 실험장치 구성도

그림 6은 레이저 간섭계의 위상 안정화 제어 시스템의 구성도이다. 광원은 중심파장이 1310 nm 캔 타입의 Fabry-Perot 레이저 다이오드를 사용하였다. 입사된 광원은 50:50 2x2 광섬유 커플러로 나뉘고, 각각의 광섬유 끝단에서 반사된 광신호는 다시 커플러를 거쳐 PD에서 간섭을 일으키게 된다. PD에서 검출되는 간섭신호는 DAQ(Data Acquisition)보드를 이용하여 디지털화한 후 컴퓨터로 읽어 들이며 LabVIEW 프로그램으로 구성된 퍼지 PI 제어기로 PZT를 조절하여 PD의 간섭 출력을 안정화 시킨다.

그림 7은 위상제어장치의 블록 다이어그램이다. 그림 6과 같이 페루프 시스템을 구성한 후, 퍼지 PI를 통해서 기준전압 V_R 에 맞게 PD의 간섭 출력을 안정화 시킨

후, 신호발생기를 이용하여 스위칭 신호 T를 가하여 준다. 신호 T에 따라서 동작하는 토크 스위치와 Fuzzy PI제어기는 위상의 π 만큼씩 증가하는 위상 계단을 만들게 된다. 신호 T를 CCD 카메라와 동기화시켜서 위상 변화에 따른 프레임을 획득하여, 위상정보를 구할 수 있으며, CCD 카메라의 프레임 획득 속도는 신호 T의 속도에 따르게 된다.

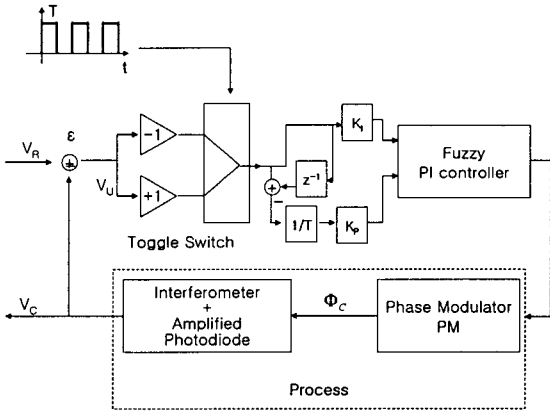


그림 7. 위상제어장치의 블록 다이어그램

그림 8은 퍼지 PI제어에 따른 간섭계의 출력이다. 처음 0.8초 동안 PI제어가 되지 않는 경우에는 위상이 크게 흔들리고 있지만, PI제어를 시작한 후에는 빠르게 기준전압 1.2 V에 간섭계 출력이 수렴하여 안정화됨을 보여준다.

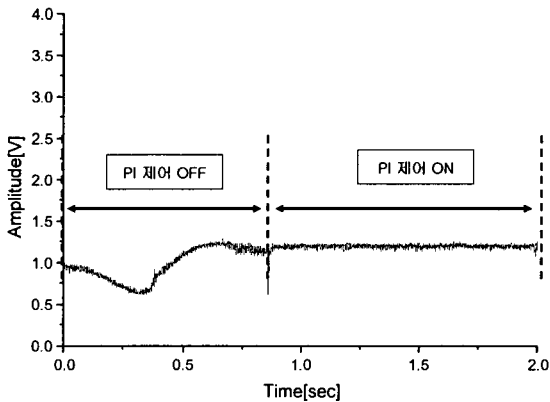


그림 8. 퍼지 PI제어에 따른 간섭계 출력

그림 9은 퍼지 PI제어 중 진동을 인가한 그림이다. 제

어를 하지 않는 경우에는 진동에 따라 간섭신호가 크게 흔들리지만, 퍼지 PI제어를 하는 경우에는 진동이 가해진 후 빠른 속도로 안정화됨을 볼 수 있다.

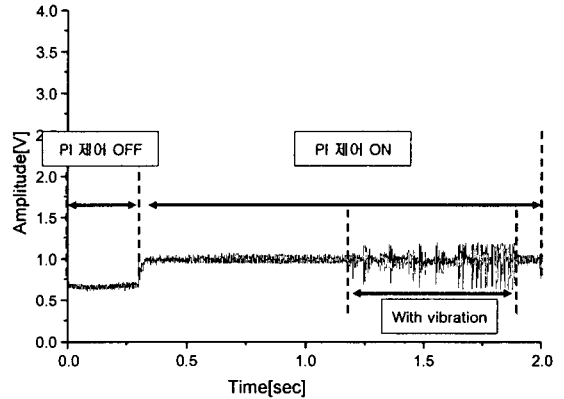


그림 9. 퍼지 PI제어 중 진동 인가

그림 10은 스위칭 신호 T와 퍼지 PI제어기에 의한 위상계단이다. 간섭계 출력의 위상을 π 만큼 연속적으로 위상 이동시키는 위상계단의 간격은 신호 T의 주기이다. 간섭계 출력 위상이 감소하는 지점에서는 내려가는 위상계단이 생성되며, 위상이 증가하는 지점에는 올라가는 계단이 생성된다. 위상계단은 증폭기의 한계 값까지(± 15 V) 생성된다. 그림 11은 위상계단 파형에 따른 PD 출력 값이다. 그림 11에서 신호 T에 따라 주기적으로 PD 출력의 변화를 볼 수가 있다.

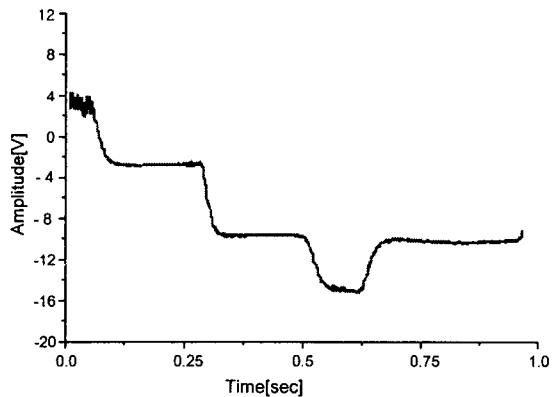


그림 10. 위상 이동 출력

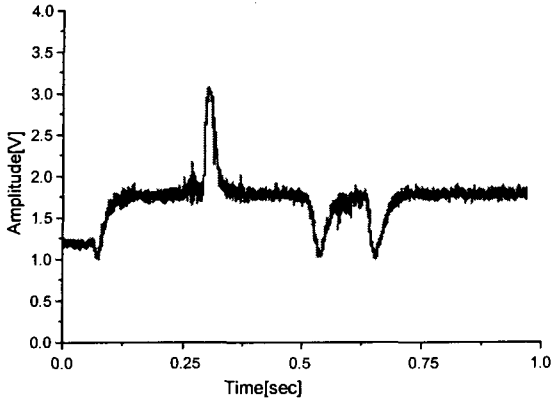


그림 11. 위상 이동에 따른 PD 출력

3. 결 론

광섬유형 ESPI는 벌크형에 비해서 구성하기 간단하고 취급하기 편하고, 광손실이 적은 장점이 있지만, 환경적인 외란(진동, 온도)에 민감하고 위상이동을 위해서 사용되는 위상 변조기의 비선형성 오차를 가진다.

이러한 단점을 극복하기 위해서 퍼지 PI제어기를 사용하였으며, 그 결과 빠르고 안정적으로 출력 위상을 조절 할 수 있었다.

본 실험에서 구성된 시스템은 미소변위 측정, 구조물의 내부결합, 크랙검출 및 미소 대상체의 형상 측정 등 레이저 간섭법에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] T. P. Newson, J. L. Santos and D. A. Jackso, "Electronic speckle pattern interferometry compensated for environmentally induced phase noise", SPIE 1267, 173-179, 1990.
- [2] J. D. Valera, D. Harvey, and J. D. C. Jones, "Fiber optic electronic speckle pattern interferometry: Path length stabilised automatic phase stepping," IEE vol 342, pp. 180-184, 1991.
- [3] C. R. Mercer and G. Beheim, "Fiber optic phase stepping system for interferometry," Appl. Opt., vol. 30, pp. 729-734, 1991.
- [4] Y. Ishii and R. Onodera, "Phase-extraction algorithm in laser-diode phase-shifting interferimetry," Opt. Lett., vol. 20, pp. 1883-1885, 1995.
- [5] D. Parisi, M. Facchini, and G. Martini, "Automatic Phase Stepping in Fiber-Optic ESPI by Closed-Loop Gain Switching," Transaction on instrumentation and measurement, vol. 49, pp. 823-828, 2000
- [6] E. H. Mamdani, Application of fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant, Proc. IEEE vol

- 121 pp.1585-1588, 1974
- [7] E. H. Mamdani, Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers, Internat. J. Systems Sci. vol 24 pp. 1849-1861, 1993.
 - [8] H.R. Berenji, Fuzzy logic controllers, in: R.R. Yang er and L.A. Zadeh, Eds, An Introduction to Fuzzy Logic Application in Intelligent Systems (Kluwer Academic Publisher, Boston, MA) pp. 69-96, 1992