

패치형 광섬유 센서를 이용한 구조물의 동특성 감지 및 퍼지 진동 제어

On-line Phase Tracking of Patch Type EFPI Sensor and Fuzzy Logic Vibration Control

한재홍* · 장영환** · 김도형*** · 이 인****

Han Jae-Hung, Chang Young-Hwan, Kim Do-Hyung and Lee In

Key Words : Patch Type EFPI(패치형 외인성 패브리-페롯), On-line Phase Tracking(실시간 위상 추적), Fuzzy Logic(퍼지 제어)

ABSTRACT

On-line phase tracking of an extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) and experimental vibration control of a composite beam with a sensing-patch are investigated. We propose a sensing-patch for the compensation of the interferometric non-linearity. In this paper, a sensing-patch that comprises an EFPI and a piezo ceramic(PZT) is fabricated and the characteristics of the sensing-patch are experimentally investigated. A simple and practical logic is applied for the real-time tracking of optical phase of an interferometer. Experimental results show that the proposed sensing-patch does not have the non-linear behavior of conventional EFPI and hysteresis of piezoelectric material. Moreover, it has good strain resolution and wide dynamic sensing range. Finally, the vibration control with the developed sensing-patch has been performed using Fuzzy logic controller, and the possibility of sensing-patch as a sensoriauator is considered.

1. 서 론

최근 스마트 구조 분야에서, 기존의 감지기들을 결합한 패치 형태의 감지기에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 이러한 형태의 패치형 감지기는 기존의 감지기들의 장점을 극대화시키고 개별적으로 사용 시에 나타나는 단점을 보완할 수 있는 특징이 있다. 또한 이러한 패치형 감지기는 결합 형태에 따라 감지 기능뿐만 아니라 작동능력을 가질 수 있어 감지작동기로의 확장이 가능하다. 이와 같이 패치형 감지기는 인간의 신경과 근육을 모사한 형태의 보다 더 현실적인 스마트 감지작동기로 활용될 수 있다.

많은 감지기 중에서도, 광섬유를 이용한 감지기의 개발 및 이를 적용한 연구는 대형 토목 구조물, 항공기 그리고 우주 구조물의 건전성 모니터링 분야에서 활발히 진행되고 있다. 이는 광섬유가 매우 작아서 복합재료와 같은 구조물에 삽입하여 사용이 가능하고 분해능이 매우 높다는 장점이 있기 때문이다. 또한 구조물에 인간의 신경망과 유사한

감지 시스템을 부여할 수 있기 때문에, 파단 감지와 같은 건전성 모니터링에 적합하며, 구조물의 파단, 변형률, 하중, 압력, 온도 등을 측정하거나 모니터링 하는데 많이 쓰이고 있다. 여러 가지 형태의 광섬유 감지기 중에서도 간섭 현상을 이용한 감지기법이 많이 사용되고 있다. 그러나 간섭 특성으로 인하여, 감지기의 비선형 응답이 나타나는 문제점이 있어, 이를 해결하기 위한 감지기법의 변화나 신호처리 기법에 관한 연구가 많이 수행되었다⁽¹⁻³⁾. 그러나 이러한 기법들은 매우 복잡하여 실시간으로 구조물의 동특성을 감지하는 시스템을 구성하기에는 많은 한계점이 있고, 제한된 범위 이내의 주파수 범위와 감지 범위에 한하여 적용이 가능하다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 한계점을 해결하기 위해, 새로운 형태의 패치형 감지기와 위상 추적 기법에 대해 소개하고자 한다. 또한 제시된 패치형 감지기를 이용한 구조물의 진동 제어 실험과 감지작동기로서의 확장 가능성을 살펴보고자 한다.

2. 패치형 감지기 및 위상 추적 기법

본 연구에서는 외인성 패브리-페롯 간섭계(EFPI)를 이용한 패치형 감지기를 제시하였다. 패치형 감지기에 대한 도

* KAIST 항공우주공학전공 조교수
E-mail : jaehunghan@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3723, Fax : (042) 869-3710

** 현대, 기아 연구개발본부

*** 한국항공우주연구원 회전기기 그룹

**** KAIST 항공우주공학전공 교수

식은 Fig. 1에 나타나 있다.

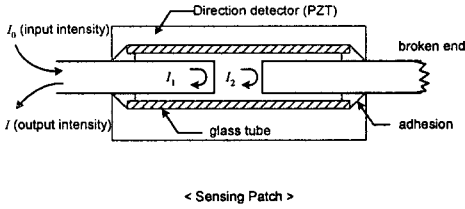


Fig. 1 Schematic diagram of a sensing-patch

일반적으로 EFPI의 출력 광강도 신호, I 는 다음과 같은 정현파 함수로 나타낼 수 있다:

$$I \propto A + B \cos \phi \quad (1)$$

여기서 A 와 B 는 광섬유 코어의 반경, 공기층 간격, 공기/유리 반사면 사이의 투과 계수, 개구수와 관련된 함수이고 ϕ 는 광학적 위상을 나타낸다. 공기층 간격의 변화가 작은 경우에는 A 와 B 의 값의 변화는 무시할 수 있기 때문에 상수로 가정할 수 있고, EFPI 광강도 신호를 통해서 쉽게 구할 수 있다. 또한 광학적 위상, ϕ 와 간극, s 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = 2ks \quad (2)$$

여기서 $k = 2\pi n_c / \lambda_0$ 로 정의된 값이고, n_c 는 광섬유의 굴절률, λ_0 는 진공에서 레이저 다이오드의 파장 길이를 나타낸다. 본 논문에서는 1310 nm 파장의 광원을 사용하였다. 따라서 식 (1)과 (2)를 이용하면 간극, s 는 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$s = \frac{1}{2k} \cos^{-1} \left(\frac{I-A}{B} \right) \quad (3)$$

간섭형 광섬유 감지기의 경우, 간섭 특성으로 인해서, EFPI의 출력 광강도 신호는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 기계적인 변형에 대해 선형 관계를 나타내지 못한다. S1은 기계적인 변형을 의미하고 이에 대한 광강도 신호는 II과 같이 나타나게 된다. S2는 S1과 같은 크기의 변형으로 초기 위상으로 인하여, I2와 같이 왜곡된 응답을 나타내고 있다. 또한 S3와 I3는 기계적인 변형량이 큰 경우에 나타나는 비선형 현상을 나타내고 있다. 따라서 기존의 EFPI 광섬유 감지기의 경우에는 미소 진동이나 저주파 진동의 경우에만 사용이 가능하여 많은 제약이 있었다.

왜곡된 EFPI 광강도 신호로부터 기계적인 변형량을 얻기 위한 방법 중 하나는, 식 (3)을 이용하여 매시간 스텝의 위

상 변화를 구하여 누적하면 된다. 그러나 식 (3)에 나타난 아크 코사인(arc cosine) 함수의 경우 0부터 π 사이의 값이 나타나는 불연속 함수이기 때문에, 실시간 위상 누적을 위해서는 불연속 지점에서의 방향성 정보를 필요로 하게 된다. 이러한 변형의 방향성 정보를 얻기 위해서, 방향성을 나타낼 수 있는 감지기를 필요로 하게 되며, 본 논문에서는 작동기로도 사용이 가능한 압전 재료를 사용하였다; 따라서 이러한 형태의 패치형 감지기는 감지작동기로의 확장이 가능하다. 따라서 EFPI 광강도 신호와 변형률에 관한 정보를 이용하여, 기계적인 변형을 의미하는 광학적 위상은 다음과 같이 매 스텝으로 실시간으로 구할 수 있다.

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \text{sign}(\text{strain rate}) \times \left| \cos^{-1} \left(\frac{I_{k+1}-A}{B} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{I_k-A}{B} \right) \right| \quad (4)$$

여기서 $\phi_k (= 2k s_k)$ 는 k 번째 광학적 위상을 의미한다. 또한 위상 누적에 의해 발생하는 오차는 고주파 필터링을 통해서 제거할 수 있다.

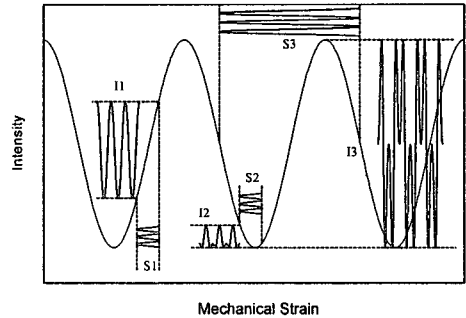


Fig. 2 Signal fading in fiber interferometers

3. 퍼지 논리 제어

퍼지 논리 제어는 구조물의 진동 제어뿐만 아니라 다양한 분야에 적용할 때, 에너지 관점에 있어서 매우 효과적인 제어 성능을 나타낸다. 또한 퍼지 제어기의 장점으로는 고유의 강건성과 비선형이나 불확실성을 포함하는 구조물의 거동이나 하중에도 적용이 가능한 점이다.

본 절에서는 구조물의 진동 저감을 위한 퍼지 논리 제어기(FLC)의 설계에 대해 다루고자 한다. 일반적으로 퍼지 제어기는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 크게 4가지 요소로 구성되어 있다. 첫째, 퍼지화 단계(fuzzification) 둘째, 지식 베이스 구축 단계(knowledge base construction) 셋째, 의사 결정 단계(decision making stage), 마지막으로 비퍼지

화 단계(defuzzification stage)가 그것이다. 이 중 세 번째에 해당하는 의사 결정 단계는 퍼지 추론 단계라고도 불린다. 즉 퍼지 제어의 핵심인 제어 행위를 위한 퍼지 집합을 결정하는 단계로 생각할 수 있다. 각각의 구성 요소에 대해 간단히 살펴보면 다음과 같다⁽⁴⁾.

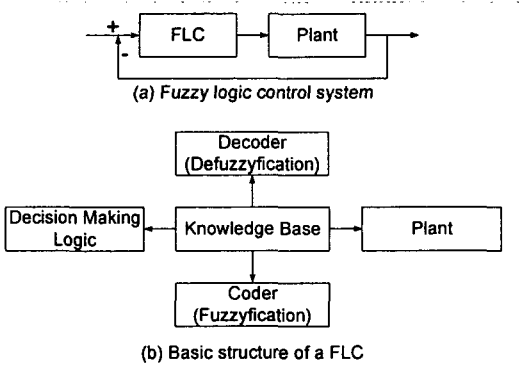


Fig. 3 Basic structure of a fuzzy logic controller

(1) 퍼지화 단계 (Fuzzification stage)

제어를 수행하기 위해서 먼저 제어 대상이 있어야 할 것이고 이러한 제어 대상으로부터 관측된 값이 있어야 한다. 이 때의 값은 항상 하나의 값으로 측정되는데 퍼지 제어에서는 퍼지 집합을 기본으로 추론을 수행하기 때문에 이를 처리하기 위해서는 관측된 값을 퍼지 집합으로 만들 필요가 있다. 이러한 일을 수행하는 단계가 퍼지화 단계이다.

(2) 지식 베이스 구축 단계 (Knowledge base construction stage)

지식 베이스는 전문 조작원의 제어에 대한 지식을 컴퓨터에 이전시킨 것이다. 데이터베이스는 퍼지 제어에서 사용되는 언어적 제어 규칙과 모호한 데이터를 다룰 수 있는 정의를 해야 한다. 언어 제어 규칙들의 모임에 의하여 해당 분야의 전문가들이 갖는 제어 목표와 제어 정책들을 특성화 시켜야 한다.

(3) 의사 결정 단계 (Decision making stage)

의사 결정 단계는 구축된 지식 베이스를 계속 참조하면서 퍼지화된 입력 값을 추론의 합성 규칙과 퍼지 합출을 이용하여 결론적 퍼지 집합으로 추론하는 단계이다.

(4) 비퍼지화 단계 (Defuzzification stage)

앞선 단계를 수행한 결과는 제어값을 퍼지 집합으로 만든다. 그러나 제어 대상을 제어하고자 할 때 제어값은 처음 제어 대상으로부터 얻은 값과 마찬가지로 하나의 값으로 계산해야 하고 비퍼지화 단계에서 이러한 일을 수행한다.

본 논문에서는, 변위(x)와 속도(\dot{x}) 정보를 사용하여 FLC를 구성하였다. 제어기의 출력값은 요구되는 제어력(u)으로 정하였고 멤버십 함수는 입력과 출력 변수에 대해서 삼각형 혹은 사다리꼴 형태로 Fig. 4에 나타난 바와 같이 결정하였고, 퍼지 공간상의 변수들은 Table 1에 나타난 바와 같다.

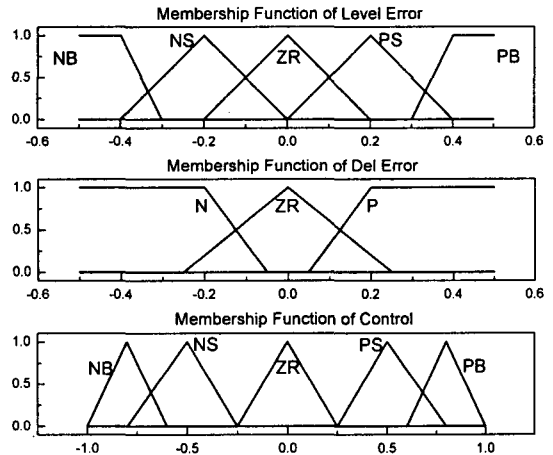


Fig. 4 Membership function for displacement, velocity and control

Table 1 Fuzzy variables

ZR = Zero
PS = Positive and Small
PB = Positive and Big
NS = Negative and Small
NB = Negative and Big

Table 2 FAM for the fuzzy controller

	PB	PB	ZR
	PS	PS	ZR
	ZR	ZR	ZR
	ZR	NS	NS
	ZR	NB	NB

퍼지 제어기는 직관적인 방법으로 진동을 억제하도록 설계하여 정하였고, 제어기 시스템의 규칙은 가진력에 대한 구조물의 변위, 속도 성분에 대해 저감하는 방향으로, Table 2와 같은 Fuzzy Associative Memory (FAM)를 구성하였다.

4. 실험 결과 및 논의

실험에 사용된 시편으로는 복합재료 빔 구조물 (graphite/epoxy [0]_s, 폭 2cm, 길이 20cm)을 사용하였고

제어력을 가하기 위한 압전 작동기와 앞서 제시한 패치형 감지기를 제작하여, Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 고정단으로부터 4 cm 상단에 부착하였다.

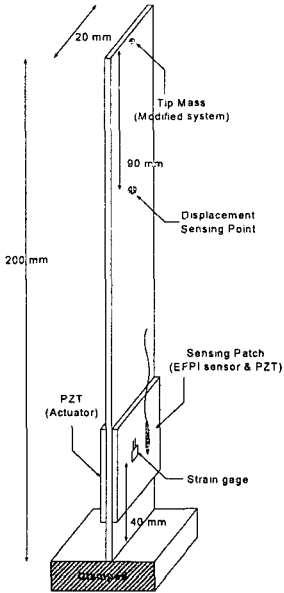


Fig. 5 Schematic diagram of the specimen

EFPI 감지기 시스템은 레이저 다이오드의 온도를 균일하게 유지시키기 위한 온도 제어기를 포함하고 있고, 본 실험에서는 25°C를 유지하도록 하였으며 17 mA 전류로 레이저 다이오드를 구동하였다. 패치형 감지기를 통해 얻은 실시간 광학 위상 신호를 구조물의 실제 진동 신호와 비교하기 위해서 레이저 변위 감지기(LB041, Keyence)와 스트레인 게이지를 사용하였다. 변위 감지 위치는 구조물의 끝단으로부터 9cm 아래 지점을 선택하였으며 스트레인 게이지는 패치형 감지기 가운데에 부착하였다.

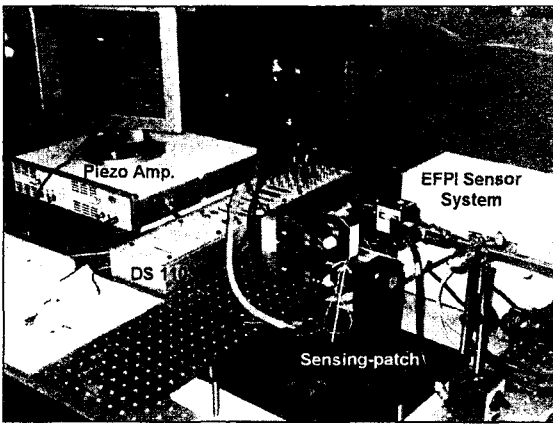


Fig. 6 Experimental set-up

Fig. 6은 전체적인 실험 구성을 나타낸 것으로 EFPI 감지 시스템과 레이저 변위 감지기, DS1103 신호처리 보드, 압전 재료 구동을 위한 앰프와 실험 시편을 포함하고 있다.

4.1 실험을 통한 위상 누적 기법 검증

패치형 EFPI 센서의 게이지 길이는 10 mm이고 공기

간극은 41 μm 이다. 자유진동 신호를 통해 식 (1)의 A, B 그리고 초기 광학적 위상을 구하였고 각각 2.156, 2.125, 2.4872 의 값을 가진다. 실험에 사용한 샘플링 주파수는 2 kHz 이다. 먼저 위상 누적 기법을 통해 얻은 광학적 위상 신호와 레이저 감지기를 통해 얻은 신호를 비교하기 위해서 자유 감쇠 진동과 1차 공진 주파수(38Hz)로 연속적인 사인(sine) 가진한 경우에 대해서 실시간 신호를 취득해 보았다. Fig. 7과 8은 각각의 경우에 대한 실험 결과를 나타낸 것으로 위상 누적 기법을 통해 획득한 신호와 레이저 감지기를 통해 얻은 구조물의 동특성 경향이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림에서 상단부는 광섬유의 광강도 신호를, 중앙은 레이저 감지기를 통해 취득한 신호, 그리고 하단부는 실시간 위상 누적 기법을 통해 얻은 신호를 각각 나타내고 있다.

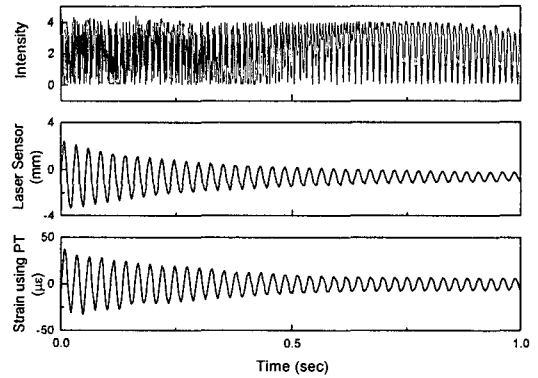


Fig. 7 Experimental result of phase tracking during free decay

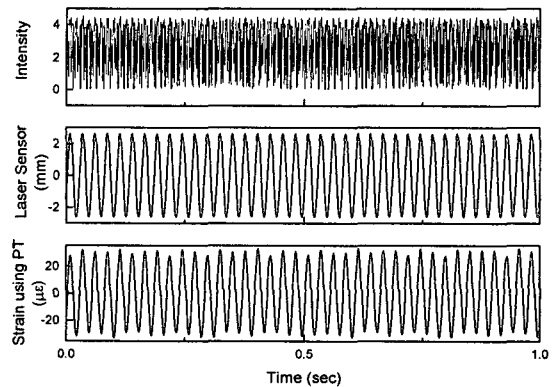


Fig. 8 Experimental result of phase tracking during sine excitation

레이저 감지기를 통한 간접적인 비교 결과, 실시간 위상 누적 기법을 통해 얻은 신호가 구조물의 동특성을 잘 나타

내고 있는 것을 확인하였다. 다음으로는 직접적인 변형률 비교를 위해서 스트레인 게이지 신호와 비교하였다. Fig. 9 는 스트레인 게이지 신호와 패치형 감지기에서 얻은 신호를 위상 추적 기법을 통해 실시간으로 얻은 결과를 나타내고 있다. 일반적으로 스트레인 게이지는 전기적 외란의 간섭을 받지만, 패치형 감지기의 경우 광섬유 감지기의 신호를 주된 신호로 사용하기 때문에 전기적 외란의 간섭을 받지 않아 매우 높은 분해능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 압전 재료의 히스테리시스 거동이 위상 추적 기법에 미치는 영향에 대한 실험적 검증은 수행하였다. 일반적으로 압전 재료의 경우 감지기로도 많이 사용되고 있으나 히스테리시스 거동을 나타내는 문제점을 가지고 있다. Fig. 10의 왼쪽 그림은 실험을 통해 얻은 일반적인 압전 재료의 히스테리시스 거동으로 수 Hz에서 수백 Hz에서 나타나는 기계적인 변형에 따른 PZT 응답을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 10의 오른쪽 그림은 변형률에 대한 PZT 응답의 변화를 관계를 나타낸 것으로 실제로 위상 추적 기법의 경우, 압전 재료로부터 변형률의 부호 성분만을 필요로 하기 때문에 히스테리시스 거동에 대한 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다.

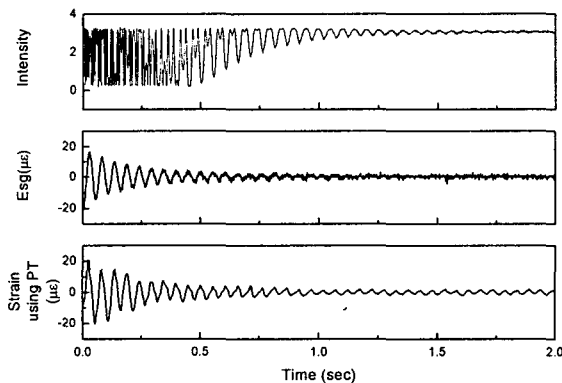


Fig. 9 Experimental result of strain gage and optical phase tracked signal

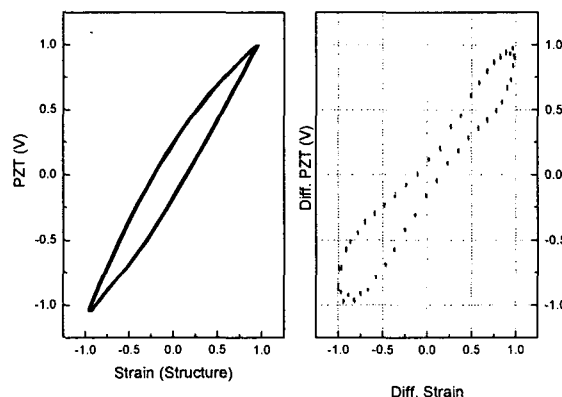


Fig. 10 Hysteretic behavior of piezoelectric material

Fig. 7에서 10가지의 실험 결과로부터, 패치형 감지기를 이용한 실시간 위상 추적 기법에 대한 검증을 수행하였다. 실험 결과 실시간으로 구조물의 동특성을 잘 나타내고 있는 것을 확인하였고, EFPI 비선형 응답에 대한 보상과 압전 재료의 히스테리시스 거동 문제를 해결할 수 있었다.

4.2 광학적 위상 신호를 이용한 진동 제어

본 절에서는 패치형 감지기와 위상 추적 기법을 통해 얻은 신호를 기초로 하여 구조물의 진동 제어를 수행하였다. 퍼지 제어기의 제어 성능을 비교하기 위해서 PPF(Positive Position Feedback)제어기를 사용하여 제어기 성능을 비교하였다. 이 때 PPF 제어기는 구조물의 공진 주파수로 설계하였다⁽⁵⁾.

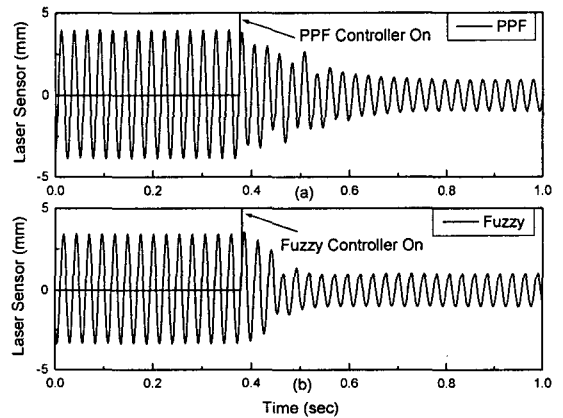


Fig. 11 Control results based on phase tracked signal (a) PPF control (b) Fuzzy logic control

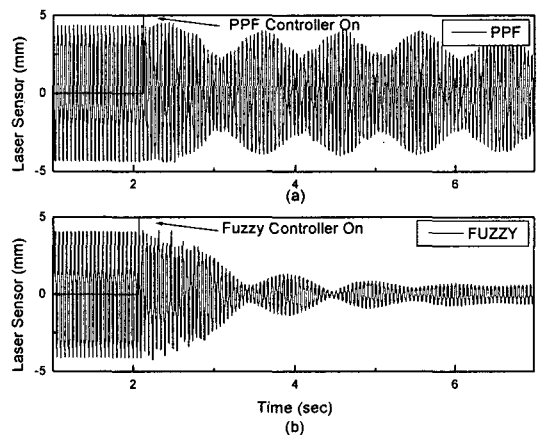


Fig. 12 Control results based on phase tracked signal in the case of modified system (a) PPF control (b) Fuzzy logic control

Fig. 11은 구조물을 공진 주파수(38 Hz)로 조화 가진할 때 두 제어기를 이용한 구조물의 진동 제어 수행 결과를 나타낸 것으로 퍼지 제어기가 보다 빠르게 진동을 저감함을 관찰할 수 있다. 다음으로 제어기의 강건성 비교를 위해 앞서 설계한 두 제어기를 변화된 시스템에 적용하여 보았다. 시스템 변화는 구조물의 끝단에 집중 질량을 부착하였고 1차 공진주파수를 20 Hz로 변화시켰다. Fig. 12는 이에 대한 제어 결과를 나타낸 것으로 퍼지 제어기의 경우 비교적 제어 성능을 잘 유지하고 있으나 PPF 제어기의 경우 진동 저감 성능이 크게 저하됨을 확인하였다.

4.3 감지작동기로서의 가능성

본 절에서는 패치형 감지기를 감지작동기로 확장하여 자유 감쇠 진동에 대해서 진동 제어를 수행해 보았다. 감지작동기는 앞서 언급하였듯이 감지기와 작동기로 동시에 사용할 수 있는 것으로 폐회로 제어에서 안정성을 높일 수 있고, 하나의 모듈로 두 가지 기능을 할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 압전 재료는 기전 연계 특성을 가지고 있기 때문에 이러한 특성을 이용하여 감지작동기로 사용하려는 많은 연구가 수행되었다. 그러나 온도나 가해지는 전압에 따른 압전 재료의 정전 용량의 변화 등으로 감지기로써 성능이 저하되는 문제점으로 인하여, 관련 연구의 지속적인 발전이 이루어지지 않았다. Lowell⁽⁶⁾은 압전 재료와 간단한 자기 감지 브릿지 회로(self-sensing bridge circuit)를 제안하여, 변형을 신호가 획득 가능한 감지작동기를 개발하였다. 그러나 압전 재료의 비선형 거동으로 인한 여러 문제점과 변형을 신호의 주파수 특성에 따른 제약이 한계점으로 나타났다.

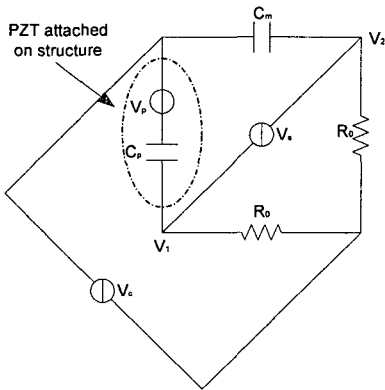


Fig. 13 Modified self-sensing bridge circuit

본 논문에서 사용하는 위상 누적 기법은 압전 재료에서 얻어지는 변형을 정보의 부호 성분만을 이용하기 때문에,

Lowell⁽⁶⁾이 제시한 회로 형태를 패치형 감지기와 사용함으로써 구조물의 변형량을 감지할 수 있는 감지작동기로 확장할 수 있다. Fig. 13은 본 실험에서 사용한 자기 감지 브릿지 회로를 나타낸 그림이다: 측정되는 신호 V_s 는 변형률 신호를, V_p 와 V_c 는 각각 압전재료의 순방향 효과로 인해 발생한 전하량 신호와 압전 재료에 가해지는 제어 신호를 의미한다. 따라서 위상 누적은 V_s 의 부호 성분과 EFPI 광섬유의 광강도 신호를 이용하여 구조물의 동특성을 파악하게 되고 PZT는 동시에 작동기로 사용될 수 있다.

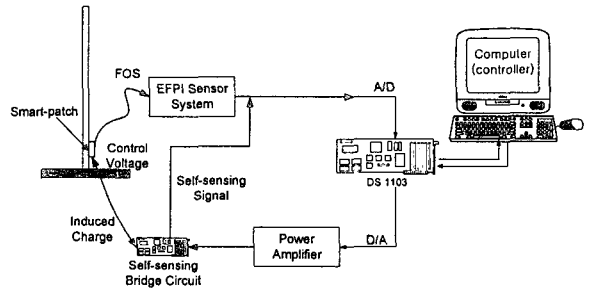


Fig. 14 Overall experimental set-up of patch type EFPI sensor as a sensor/actuator

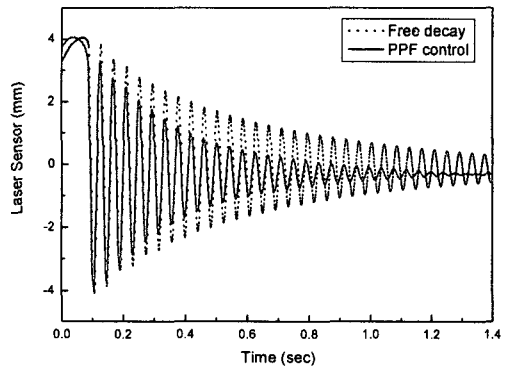


Fig. 15 Vibration suppression result using patch type EFPI sensor and self-sensing bridge circuit

Fig. 14는 전체적인 실험 구성을 나타낸 것으로 대부분의 구성은 앞선 실험과 같고, 실험 시편은 복합재료 (graphite/epoxy [0₂/90₂]_s, 폭 2 cm, 길이 20 cm, 집중 질량)이다. 또한 레이저 다이오드는 30 °C를 유지하고 0.476 mW로 구동하였다. 이 때 패치형 감지기는 고정단으로부터 3.5 cm 위에 부착하였고, 자기 감지 회로를 이용하여 감지기와 작동기로 동시에 사용 가능하도록 구성하였다.

Fig. 15는 본 논문에서 제시한 패치형 광섬유 감지기와 자기 감지 브릿지 회로를 이용한 감지작동기를 통해, 구조

물의 진동을 제어한 결과이다. 점선은 자유 감쇠 결과를, 실선은 위상 누적 신호를 PPF 제어기의 입력 신호로 사용하여 제어한 결과이다. 결과로부터 알 수 있듯이 감지작동기를 통해서, 구조물의 동특성 감지와 제어력을 동시에 수행할 수 있는 것을 확인하였고, 잔류 진동을 빠르게 억제할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 새로운 형태의 패치형 광섬유 감지기를 구성하여 기존의 간섭형 광섬유 센서가 가지는 비선형 특성을 보완하고 진동 감지 능력을 향상시키는 연구를 수행하였다. 비선형성 개선을 위해 위상 누적 기법을 제시하였고, 이를 적용한 실시간 진동 감지와 퍼지 제어기를 이용한 진동 제어 실험을 성공적으로 수행하였다. 또한 압전 재료만으로 구성하는 감지작동기의 문제점을 보완할 수 있는 새로운 형태의 감지작동기로서의 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2000년도 과학기술부 국가지정연구실사업(2000-N-NL-01-C-250)의 지원으로 수행된 연구 결과의 일부이며, 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Murphy, K. A., Gunther, M. F., Vengsarkar, A. M. and Clau, R. O., 1991, "Quadrature Phase-shifted Extrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors," *Optics Letters.*, Vol. 16, pp. 273-275.
- (2) Doyle, C. and Fernando, G., 1997, "A Novel Fibre-optic Vibration Sensor," *Journal of Materials Science Letters.*, Vol. 16, pp. 1104-1105.
- (3) Kim, D. H., Han, J. H., Kim, D. H. and Lee, I., 2004, "Vibration Control of Structures with Interferometric Sensor Non-linearity," *Smart Materials and Structures* Vol. 13, pp. 92-99.
- (4) Lee, C. C. 1990, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, Vol. 20, No. 2, pp. 404-418.
- (5) 장영환, 김도형, 양승만, 박기연, 류근호, 이 인, 2002, "PPF/Adaptive PPF 제어기를 이용한 실린더를 부착한 복합재 보의 와류 유발 진동 제어," *한국복합재료학회 추계학술대회 논문집*, pp. 147-150.
- (6) Lowell, J., Garcia, E. and Waites, H., 1994, "Self-sensing Control as Applied to a PZT Stack Actuator used as a Micropositioner," *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, pp. 147-156