

광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 초음파의 비접촉식 감지

장태성* · 이승석** · 김영길** · 권일범** · 이왕주*** · 이정주†

(2001년 1월 26일 접수, 2001년 6월 23일 심사완료)

Non-contact Detection of Ultrasonic Waves Using Fiber Optic Sagnac Interferometer

Tae Seong Jang, Seung Seok Lee, Young Gil Kim, Il Bum Kwon,
Wang Joo Lee and Jung Ju Lee

Key Words: Sagnac Interferometer(Sagnac 간섭계), Non-contact Detection(비접촉식 감지), Fiber Optic Sensors(광섬유 센서), Ultrasonic Waves(초음파), Phase Bias(위상 바이어스)

Abstract

This paper describes a fiber optic sensor suitable for non-contact detection of ultrasonic waves. This sensor is based on a fiber optic Sagnac interferometer. Quadrature phase bias between two interfering laser beams in Sagnac loop is introduced by a polarization controller. A stable quadrature phase bias can be confirmed by observing the interferometer output versus phase bias. This method eliminates a digital signal processing for detection of ultrasonic waves using Sagnac interferometer. Interference intensity is affected by the frequency of ultrasonic waves and the time delay of Sagnac loop. Collimator is attached to the end of the probing fiber to focus the light beam onto the specimen surface and to collect the reflected light back into the fiber probe. Ultrasonic waves produced by conventional ultrasonic transducers are detected. This fiber optic sensor based on Sagnac interferometer is very effective for detection of small displacement with high frequency such as ultrasonic waves used in conventional non-destructive testing.

1. 서 론

레이저 간섭계(laser interferometry)를 이용한 비접촉식 초음파 감지(non-contact ultrasonic waves detection)에 관한 연구가 최근 활발히 진행 중이다.^(1,2) 초음파에 의한 구조물 표면의 미세한 변위를 비접촉식으로 측정하는 데는 보통 광학 간섭계를 사용한다. 그러나, 광학 간섭계의 경우 실험실

과 같은 매우 양호한 환경에서 사용할 수 있으므로, 초음파 탐상이 필요한 현장에서 실제 적용하기는 어렵다. 광학 간섭계의 이러한 단점을 해결하기 위해 광섬유로 구성된 간섭계를 활용하여 초음파 변위 감지를 수행하려는 연구가 진행되어 왔다.^(3~8) 광섬유 센서(fiber optic sensors)는 가볍고, 적응성이 우수하며, 감도가 좋아서 다양한 물리량을 측정할 수 있다.⁽⁹⁾ 특히 최근 수년 사이 광섬유를 사용한 온도, 변형률, 음향 센서의 개발에는 괄목할 만한 발전이 이루어졌다.^(10~13) 광섬유 자체가 빛을 운반하고, 휠 수 있는 유연체도 파관이기 때문에 전자기 간섭의 영향을 받지 않고, 굽힘성이 좋아 피측정물의 구조에 적합한 형태로 만들 수 있다. 광섬유 센서의 이러한 장점을 활용하여 간섭계를 구성함으로써, 고온 환경과 같이 기존의 접촉식 초음파 센서로 측정이 불

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : jjlee@sorak.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3033 FAX : (042)869-3210

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹

*** 한국전자통신연구원 초고속통신기술연구부

가능한 분야에 비접촉식 광섬유 간섭계를 활용하려는 노력이 이루어져 왔다.^(3~8)

본 연구에서는 광섬유로 구성된 Sagnac 간섭계를 이용하여 비접촉식 초음파 측정 시스템을 구성하고, 초음파 탐측자의 미세한 수직변위를 감지하여 분석함으로써 초음파 센서의 성능을 평가하였다. Sagnac 간섭계는 동일한 광 경로를 서로 반대 방향으로 진행하는 두 빛간의 간섭 현상을 활용하기 때문에, 정적 광경로가 완전히 일치하는 구조이다. 정적 광경로차가 발생하지 않는 특성으로 인해 Mach-Zender나 Michelson 간섭계에서 나타나는 위상 유동은 거의 발생하지 않는다. 따라서, 광섬유 센서의 주된 잡음원 중의 하나인 광원에 의한 위상 잡음이 없으며, 광섬유 길이를 정밀하게 조절할 필요가 없다. 또한, 고주파 신호에 대한 반응도가 높을 뿐만 아니라, 주변 환경에 의한 영향이 적어서 초음파 센서로의 응용에 적합하다.

Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서의 신호처리를 위해 3×3 방향성 결합기를 이용하여, $\pi/2$ 위상 지연 관계에 있는 신호들을 얻을 수 있다.^(14,15) 그러나 이러한 방식은 환경 변화에 의한 방향성 결합기의 결합 상수 변화나 가간섭도 변화에 따른 위상 바이어스 변화로 인하여, 정밀 신호 측정에는 적합하지 않다. Fomitchov 등^(4,6,8)은 편광 유지 광섬유 및 편광 유지 방향성 결합기를 사용한 Sagnac 간섭계 시스템에서, AOM(acousto-optic modulator)을 활용하여 $\pi/2$ 위상 바이어스를 인가하고, 초음파 변위를 감지한 바 있다. 최근에는 Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 음향 센서의 신호처리를 위해, 기존 신호처리 방식들의 단점을 보완하는 이중 위상 천이 기법(binary phase shift keying)이라 불리는 새로운 신호처리 기법이 제안되었다.⁽¹⁶⁾

Sagnac 간섭계에서는 보통 광섬유 루프 내 복굴절의 변화에 의한 위상 바이어스 변화가 존재한다. 이왕주^(17,18)는 임의의 입사 편광에 대해 Sagnac 루프 내 양방향으로 진행하는 두 빛 사이에 $\pi/2$ 위상차가 인가되는 광경로상의 특정한 복굴절이 존재함을 증명하였다. 본 연구에서 제시한 광섬유 Sagnac 간섭계의 최대 감도는, Sagnac 루프 내 설치된 하나의 광섬유 편광 조절기를 사용하여 광섬유 내 복굴절을 조절하여 $\pi/2$ 위상 바이어스를 인가함으로써 얻어지며, $\pi/2$ 위상 바

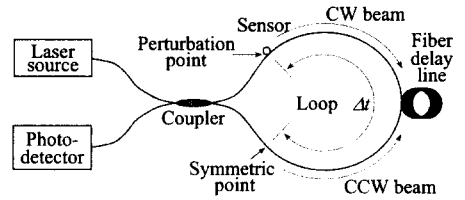


Fig. 1 Optical schematic of Sagnac loop

이어스 인가는 위상변조기와 편광조절기 조절에 따른 출력 파형 변화 관찰로부터 확인된다. Fomitchov 등의 연구^(4,6,8)에서 사용된 편광유지 광섬유, 편광유지 커플러나 전기-광학 변조기 또는 음향-광학 변조기를 필요로 하지 않으며, 따라서 더 단순하고, 저렴하게 구성될 수 있다. 본 연구에서 구성된 광섬유 Sagnac 간섭계는 별도의 신호처리 과정 없이 초음파를 쉽게 감지할 수 있다. 구성된 광섬유 Sagnac 간섭계를 이용하여 상용 초음파 탐측자 탐측면의 미세한 초음파 변위를 감지하고, 주파수 분석을 통해 감지 성능을 평가하였다.

2. Sagnac 간섭계를 이용한 초음파 센서의 원리

2.1 Sagnac 간섭계의 원리

Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서의 원리는 광섬유 루프 내 특정 위치에 외부 교란이 가해지면, 서로 반대 방향으로 루프 내를 진행하는 빛의 도달 시간 차이에 의해서 위상 차가 발생하고, 이로 인해 간섭 신호가 생성된다는 데 있다.

Fig. 1은 Sagnac 간섭계의 기본 구조인 Sagnac loop에 대한 광학적 개요도이다. 레이저 광원으로 부터 단일모드 광섬유로 입사된 레이저 빔은 2×2 방향성 결합기(directional coupler)에 의해 양방향으로 분할되어 전달된다. Sagnac 루프(loop) 내 시계방향(clockwise, CW)과 반시계방향(counter-clockwise, CCW)으로 진행한 레이저 빔은 동일한 시간에 2×2 방향성 결합기에 도달하여 합쳐진다. 서로 반대 방향으로 진행한 이들 빔은 동일한 정적 광경로(static optical path)를 갖게되며, 루프 내 센서 헤드에서의 물리량에 관련된 정보를 전달한다. 합쳐진 레이저 빔은 방향성 결합기에

의해 다시 광원과 광검출기로 전달되고, 센서가 경험한 물리량은 광검출기에 의해 감지된다. Michelson 간섭계에 비해 Sagnac 간섭계가 갖는 장점은, 본질적으로 광경로가 일치하는 구조로써 저주파 열 변동이나 진동 잡음에 의한 영향을 받지 않는다는 데 있다. 따라서, 헤테로다인 Michelson 간섭계 신호의 전자적 복조나 경로 안정화된 호모다인 Michelson 간섭계의 능동 안정화에 대한 필요성이 사라지게 된다.

시간에 따른 주위 환경변화에 기인한 물리량의 변화는 센서헤드에서 위상변화로써 감지된다. 이때, 센서 헤드에 어떠한 물리량의 변화도 주어지지 않은 경우, 위상변화가 없게 된다. 따라서, 동일한 광경로를 거친 시계방향(CW) 혹은 반시계방향(CCW) 회전 레이저 빔은 광검출기에 이르러 동일한 위상을 갖게 된다. 그러나, 외부 섭동에 의해 센서헤드에 시간에 따른 위상변화 $\phi(t)$ 가 발생하는 경우에는, 광섬유 지연선(fiber delay line)의 존재로 인해 시계방향 혹은 반시계방향으로 진행되는 두 레이저 빔이 각각 서로 다른 시간에 위상변화 $\phi(t-\Delta t)$ 와 $\phi(t)$ 를 겪게된다. Δt 는 섭동을 받은 점과 대칭점 사이를 빛이 지나는데 걸리는 시간이다.

만일, 외부 섭동 $\phi(t)$ 가 $\phi_0 \sin(\omega t)$ 의 형태로 주어진다면, 광검출기에서 감지하는 시계방향 및 반시계방향 레이저 빔의 위상차 $\Delta\phi(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi(t) &= \phi(t) - \phi(t-\Delta t) \\ &= \phi_0 [\sin(\omega t) - \sin\omega(t-\Delta t)] \quad (1) \\ &= 2\phi_0 \sin(\omega\Delta t/2) \cos\omega(t-\Delta t/2) \end{aligned}$$

따라서, 위상 차 $\Delta\phi(t)$ 는 외부섭동 신호의 주파수 ω 와 광섬유 지연선에 의한 시간 지연 Δt 의 곱에 영향을 받는다. $\omega\Delta t \ll 1$ 인 경우에는 섭동에 의한 위상변화를 광검출기에서 효과적으로 감지하기 어려우며, $\omega\Delta t = \pi$ 일 때 위상차를 최대로 나타낼 수 있다. 이때의 주파수 ω 를 loop의 고유주파수(characteristic frequency)라고 한다.

2.2 Sagnac 간섭계를 이용한 초음파 센서

Sagnac 간섭계는 고주파 신호에 대한 반응도가 높아서 초음파 센서로의 응용에 적합하다. Fig. 2는 Sagnac 간섭계를 이용한 초음파 측정 시스템에 대한 개요도이다. 레이저 광원으로부터 단일

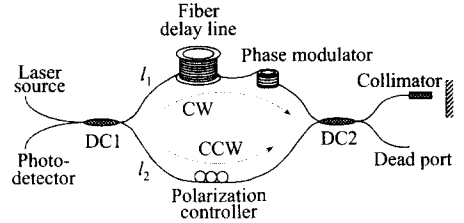


Fig. 2 Optical schematic of ultrasonic measurements system using Sagnac interferometer

모드 광섬유로 입사된 레이저 빔은 방향성 결합기 DC1에 의해 CW 빔과 CCW 빔으로 분할되어 루프를 진행한다. 이들 빔은 DC2에서 결합되어 시준기(collimator)와 사출구(dead port)로 분할된다. Sagnac 간섭계를 이용한 초음파 센서 시스템은 레이저 광원으로부터 초음파를 발생시키는 시편 변위를 경험하고 다시 광검출기까지 진행을 하는 CW 빔과 CCW 빔의 간섭에 의한 위상차 정보로부터 초음파를 탐지한다.

Fig. 2에서 광섬유 구간 l_1 은 방향성 결합기 DC1으로부터 광섬유 지연선, 위상변조기(phase modulator)를 지나 방향성 결합기 DC2에 이르는 광섬유 가닥이다. 광섬유 구간 l_2 는 방향성 결합기 DC1으로부터 편광조절기(polarization controller)를 지나 방향성 결합기 DC2에 이르는 광섬유 구간이다. CW 빔은 구간 l_1 을 지나 시준기를 통해 초음파 표면 변위를 경험하고, 시편에서 반사되어 다시 시준기로 입사되고 구간 l_2 를 지나 광검출기에 도달한다. CCW빔은 구간 l_2 를 지나 시준기를 통해 초음파 표면 변위를 경험하고, 시준기로 재입사되어 구간 l_1 을 지나 광검출기에 도달한다. 광검출기에서의 CW 빔과 CCW 빔의 전기장 e_{CW} 와 e_{CCW} 는 다음으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} e_{CW} &= E_0 \exp \left[-i \left\{ \psi_{CW} + 2ku \left(t - \frac{nl_2}{c} \right) \right\} \right] \quad (2) \\ e_{CCW} &= E_0 \exp \left[-i \left\{ \psi_{CCW} + 2ku \left(t - \frac{nl_1}{c} \right) \right\} \right] \end{aligned}$$

여기서, k 는 파수, c 는 자유 공간에서의 빛의 속도, n 은 광섬유 코어의 굴절률, ψ_{CW} 와 ψ_{CCW} 는 CW 빔과 CCW 빔의 광검출기에서의 위상이고, $u(t)$ 는 시편 표면의 초음파 변위이다. l_1 과 l_2 는

간섭계를 구성하는 광섬유의 부분 경로 길이다. CW 빔과 CCW 빔에 의한 초음파 변위 감지는 광섬유 지연선으로 인한 l_1 과 l_2 는 길이차 때문에 서로 다른 시간에 이루어진다. 광검출기에서 검출되는 두 빔의 간섭에 의한 간섭 강도 (interference intensity)는 결과적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I(t) = E_0^2 \left[1 + \cos \left\{ (\psi_{CCW} - \psi_{CW}) + 2ku \left(t - \frac{nl_1}{c} \right) - 2ku \left(t - \frac{nl_2}{c} \right) \right\} \right] \quad (3)$$

만일 시편 표면에서의 초음파 수직 변위 $u(t)$ 가 조화함수 $A \cos(\omega_a t)$ 의 형태를 갖는다면, 간섭 강도는 다음 식으로 나타내어진다.

$$I(t) = E_0^2 \left[1 + \cos \left\{ (\psi_{CCW} - \psi_{CW}) + 4kA \sin \left(\omega_a \frac{n\Delta L}{2c} \right) \times \sin \left(\omega_a \left(t - \frac{nL}{2c} \right) \right) \right\} \right] \quad (4)$$

이때, $\Delta L = l_1 - l_2$ 로서, 루프를 이루는 광섬유 부분 구간의 길이 차이이며, $L = l_1 + l_2$ 은 Sagnac 루프 전체 길이이다. 간섭 강도는 시편에서의 초음파 주파수 및 시간 지연 $n\Delta L/c$ 의 영향에 동시에 받는다. 시간 지연 $n\Delta L/c$ 을 τ 로 정의하면, $\omega_a \tau = \pi$ 가 될 때, 위상차에 의한 간섭 강도가 최대가 됨을 알 수 있다. 이 때의 초음파 주파수를 Sagnac 루프의 고유 주파수라고 한다. 전체 루프에서 광섬유 지연선의 길이가 상대적으로 매우 크기 때문에 ΔL 은 광섬유 지연선의 길이에 해당한다.

Sagnac 간섭계는 공통 경로 간섭계이므로, 시편

표면에서 초음파가 발생하지 않는 경우 CW 빔과 CCW 빔의 광검출기에서의 정적 위상차는 0이다. 그러나, 간섭계의 최적감도는, 식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이, CW 빔과 CCW 빔의 광검출기에서의 위상차가 $\pi/2$ 가 될 때 얻어진다. 위상 바이어스에 따른 간섭계 출력을 Fig. 3에 나타내었다.

시편 표면의 초음파 변위의 동적 범위는 매우 작으므로, CW 빔과 CCW 빔의 위상 바이어스에 따라 출력의 크기가 변화함을 알 수 있다. 위상 바이어스가 0인 경우에는 간섭계 출력 변화가 매우 작고, $\pi/2$ 위상 바이어스 인가에 의해 출력 변화폭 크게 할 수 있음을 알 수 있다. 초음파 변위와 같은 매우 작은 동적 범위의 신호를 검출하기 위해서는 $\pi/2$ 위상 바이어스 인가가 매우 중요하다. $\omega_a \tau = \pi$ 가 만족되고, $\pi/2$ 위상 바이어스 인가가 이루어지면, 간섭 강도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I(t) = E_0^2 \left[1 + \cos \left\{ \pi/2 + 4kA \times \sin \left(\omega_a \left(t - \frac{nL}{2c} \right) \right) \right\} \right] \quad (5)$$

$$= E_0^2 \left[1 - \sin \left\{ 4kA \sin \left(\omega_a \left(t - \frac{nL}{2c} \right) \right) \right\} \right]$$

시편 표면 변위가 빛의 파장에 비해 상대적으로 큰 동적 범위를 가지면, 신호의 왜곡이 발생할 수 있으나, 상용 초음파 탐상에서 다루는 대략 10nm 내외의 미세한 초음파 변위 신호 영역⁽¹⁹⁾에 대해서는, 초음파 변위가 본 연구에서 사용될 레이저 파장(1310nm)에 비해 상대적으로 작아서, $kA \ll 1$ 조건이 만족되며, 미소각 근사화(small angle approximation)를 적용하는데 전혀 문제가 없다고 판단된다. 위 식은 다시 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I(t) \approx E_0^2 \left[1 - 4kA \sin \left(\omega_a \left(t - \frac{nL}{2c} \right) \right) \right] \quad (6)$$

간섭 강도의 교류성분은 초음파 신호 크기에 비례하게 되며, 따라서, 본 연구에서 구성한 Sagnac 간섭계를 이용한 초음파 측정 시스템은 복잡한 신호처리 과정 없이 초음파 변위 정보를 얻어낼 수 있는 장점을 가진다. 그러나, 초음파 주파수에 의존하는 양만큼의 위상 천이가 존재하지만, 상용 초음파 탐상에 사용되는 주파수 대역폭이 작은 초음파 신호에 대해서는 신호의 왜곡이 발생하지 않는다. 또한 신호가 무시할 수 있

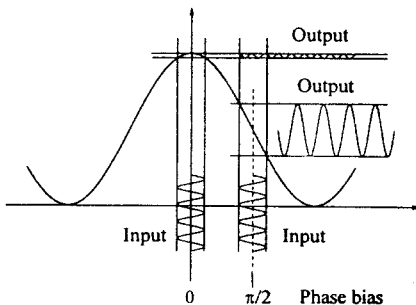


Fig. 3 Output signal versus phase bias

을 정도의 매우 작은 일정량만큼 지연되지만, 이러한 문제는 신호의 왜곡을 초래하지 않는다.

2.3 편광조절기에 의한 위상 바이어스 인가

$\pi/2$ 위상 바이어스의 인가 및 확인 방법이 또한 중요한 문제가 된다. CW 빔과 CCW 빔의 광검출기에서의 위상차 $\pi/2$ 를 얻기 위해 본 연구에서는 편광조절기를 사용하였다. Sagnac 간섭계에서는 CW 빔과 CCW 빔 사이의 위상 바이어스가 두 빔의 편광에 의한 효과로 나타나며, 온도 변화 등에 의해 시간에 따라 서서히 변화하는 특성이 있다. Sagnac 간섭계 초음파센서에서 임의의 입사편광에 대해 $\pi/2$ 위상 바이어스를 주는 광경로상의 특정한 복굴절이 존재하며, 광섬유 편광조절기로 이러한 복굴절을 만들어 줄 수 있다.^(17,18) 복굴절을 변화시킴으로써, $\pi/2$ 위상 바이어스를 안정적으로 인가하여 별도의 신호처리 없이 초음파 변위에 의한 위상 정보를 얻을 수 있다. 즉 위상 바이어스는 편광에 의해 결정되며, Fig. 2에서와 같이 편광조절기를 사용하면 쉽게 변화시킬 수 있다.

편광조절기에 의한 $\pi/2$ 위상 바이어스를 인가하고 적당한 대역 통과 필터를 사용하여 얻어지는 광검출기에서의 출력은 다음과 같이 시편 초음파 크기에 비례하게 된다.

$$I(t) \approx 4kA \sin\left(\omega_a(t - \frac{nL}{2c})\right) \quad (7)$$

원통형 PZT로 구성된 위상변조기를 사용하여 $-\pi$ 에서 π 까지의 위상 변화를 준 상태에서, 편광조절기를 조절하면서 출력 파형을 관찰함으로써 $\pi/2$ 위상 바이어스를 인가를 확인할 수 있다. Fig. 4는 입력 신호의 위상 변화가 $-\pi$ 에서 π 범위일 때, 위상 바이어스 변화에 따른 출력 파형을 나타내었다. 이로부터 $\pi/2$ 위상 바이어스 인가는 Fig. 4 (c)와 같은 출력 파형의 관찰로부터 확인될 수 있다.

한편 광섬유 지연선 길이에 따라 최대 간섭 강도가 얻어지는 고유주파수가 존재함을 앞서 언급한 바 있다. 고유 주파수는 광섬유 지연선의 길이에 반비례하며, 지연선의 길이를 변화시킴으로써, 조절할 수 있다. 예로써, $\omega_a \tau = \pi$ 관계식으로부터, 광섬유 지연선의 길이가 1km인 경우에는 고유 주파수가 대략 100kHz, 100m인 경우에는

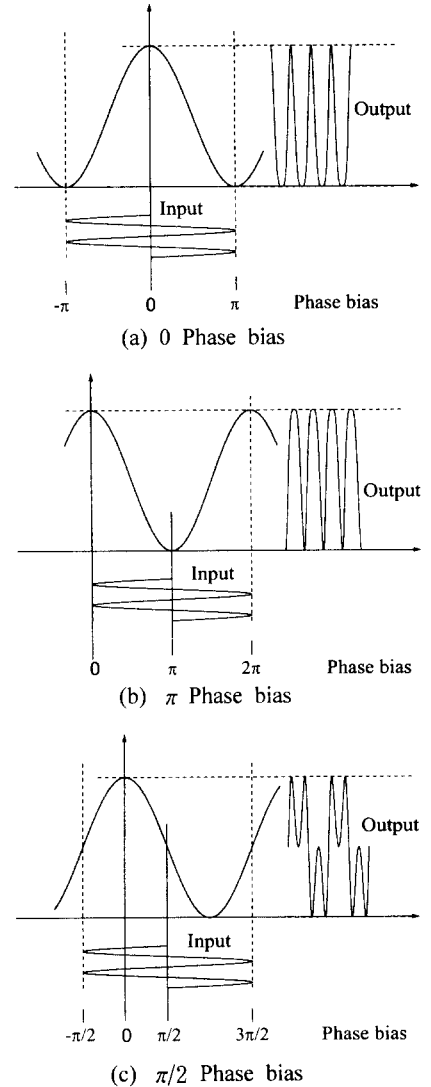


Fig. 4 Output signal pattern by phase bias change

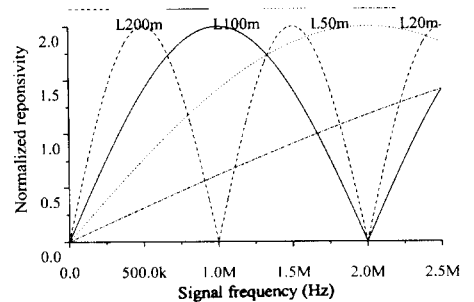


Fig. 5 Normalized responsivity of Sagnac loop

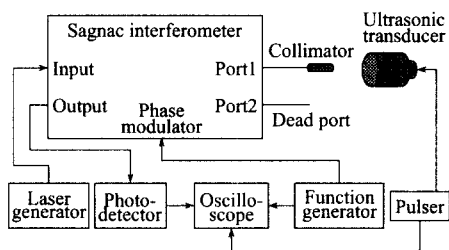


Fig. 6 Configuration of ultrasonic displacement measurements system using Sagnac interferometer

고유 주파수가 대략 1MHz가 된다. 식 (4)에 따르면, $4kA\sin(\omega_a\tau/2)$ 항의 영향으로 지연선 길이별 고유 주파수의 홀수 배에서는 두 배의 위상 반응도가 생기나, 짝수 배에서는 위상 반응도가 0이 된다. 이에 따른 광섬유 지연선의 길이별로 초음파 주파수에 따른 Sagnac 간섭계의 위상 반응도를 Fig. 5에 나타내었다. 예로써, 100m 광섬유 지연선에 대해서 1MHz 홀수 배의 초음파 주파수에서 위상 반응도가 두 배가 되며, 이때의 반치폭 (full bandwidth of half-maximum)은 대략 1.4MHz가 된다.

3. Sagnac 간섭계 초음파 센서 시스템 구성 및 초음파 측정

3.1 Sagnac 간섭계 초음파 센서 시스템 제작

Sagnac 간섭계를 이용한 초음파 센서 시스템의 개략도를 Fig. 6에 나타내었다. 레이저 광원으로서는 THORLABS사의 S1FC1310을 사용하였으며, 이 광원의 파장은 1310nm, 출력은 2mW이다. 1MHz에서 최대 간섭 강도를 얻기 위해 광섬유 구간 l_1 에 약 100m의 광섬유 지연선을 설치하였으며, 이 길이의 지연선에 대해 간섭 강도가 절반으로 감소하는 주파수는 대략 300kHz와 1.7MHz이다. $-\pi$ 에서 π 의 위상 변화를 주기 위해 원통형 PZT에 광섬유 코일을 감아 위상 변조기를 구성하고, 위상 변조기를 구동하기 위한 파형 발생기는 Stanford Research System사의 DS345를 사용하였다. $\pi/2$ 위상 바이어스를 인가하기 위해 광섬유 구간 l_2 에 편광조절기를 설치하였

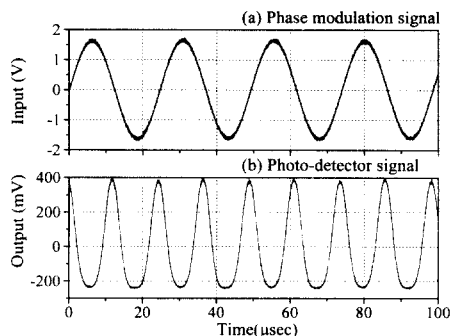


Fig. 7 Output pattern due to 0 phase bias

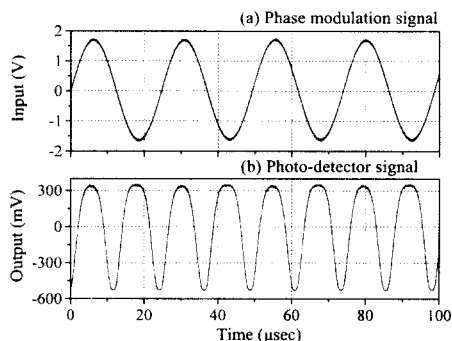


Fig. 8 Output pattern due to π phase bias

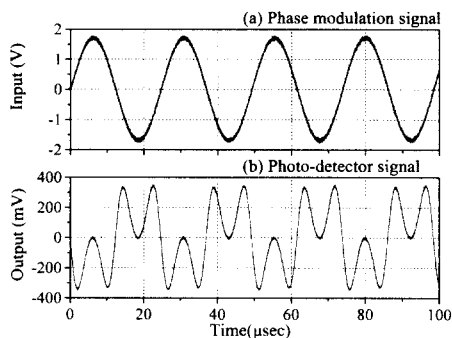


Fig. 9 Output pattern due to $\pi/2$ phase bias

다. 광검출기는 NewFocus사의 1811을 사용하였다. 출력 파형의 관찰에는 LeCroy LC534AM 오실로스코프가 사용되었다. 방향성 결합기 DC2의 한 쪽은 평상시 사용하지 않는 사출구(dead port)이지만, 필요에 따라 거울(mirror)을 부착할 수 있도록 제작하였다. 다른 쪽 광섬유의 끝단에는 광섬유 시준기를 부착하였으며, 시준기 작동거리는 2cm이다. 시준기 작동거리를 고려하여, 시편 표

면의 초음파 변위를 약 2cm 떨어져 측정할 수 있도록 구성하였다. 시준기를 통해 광섬유 밖으로 나온 레이저는 시편 표면에서 반사되어 다시 시준기를 통해 간섭계로 재입사가 이루어진다. 이때, CW 빔과 CCW 빔은 광섬유 지연선으로 인해 지연 시간 만큼 서로 다른 시간에 시편 표면의 초음파 변위에 의한 위상변화를 겪게 된다. CW 빔과 CCW 빔이 시준기 밖에서 초음파 변위를 경험하게 하기 위해, 시편으로는 초음파 탐촉자의 탐촉면을 활용하였다. Technisonic사의 1MHz 및 Panametrics사의 0.5MHz의 초음파 탐촉자를 사용하고, Panametrics사의 500PR 펄서에 의해 탐촉자를 구동시켜 초음파를 발생시킨다.

3.2 위상 바이어스 인가 및 검증

사출구에 거울을 부착하고, 파형발생기를 구동하여 위상변조기를 작동시키면, 위상변조기에 의해 $-\pi$ 에서 π 의 위상 변화를 발생시킬 수 있다. 이로 인한 위상 변화가 광검출기에 의해 출력되는데, 이때 출력 파형을 관찰하면서, 편광조절기를 조정하면 $\pi/2$ 위상 바이어스 인가 시험을 쉽게 수행할 수 있다.

탐촉면에서의 초음파 변위 측정을 위해서는 사출구의 거울이 아닌 시준기를 사용해야 한다. 시준기를 통과한 빔이 정지상태의 탐촉면에서 반사되어 다시 시준기로의 재입사가 이루어지도록 탐촉자를 시준기 전방에 설치하고, 위상변조기에 의해 $-\pi$ 에서 π 의 위상 변화를 주면서 편광조절기를 조정하여 $\pi/2$ 위상 바이어스를 인가하였다. Fig. 7, 8, 9는 파형발생기와 편광조절기를 조정하면서, 측정된 광검출기의 출력 결과의 예이다. Fig. 7은 파형발생기의 출력을 충분히 크게 하여 $-\pi$ 에서 π 의 위상 변화를 주면서, 편광조절기에 의해 0 위상 바이어스를 인가한 결과이다. 위상 변조 신호 (a)는 PZT에 인가되는 구동 전압신호를 나타낸 것이고, (b)는 광검출기에서 얻은 출력 파형을 나타낸 것이다. Fig. 8은 편광조절기에 의해 π 만큼 위상 바이어스가 인가되었을 때의 출력 파형이며, Fig. 9는 $\pi/2$ 만큼 위상 바이어스가 인가되었을 때의 출력 파형이다. Fig. 4의 출력 파형 예측과 비교해 볼 때, Sagnac 간섭계의 위상 바이어스 인가는 편광조절기에 의해 수행될 수 있음을 알 수 있다. 이들 결과로부터 제작된 Sagnac 간섭계를 이용한 초음파 센서에

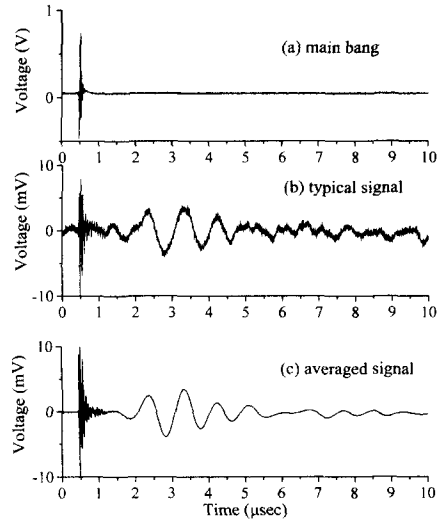


Fig. 10 Detection of Ultrasonic waves produced by conventional 1MHz transducer

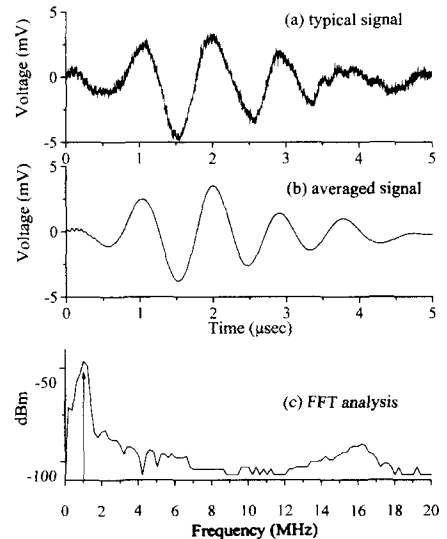


Fig. 11 Averaged signal and its power spectrum of generated ultrasonic waves

$\pi/2$ 만큼 위상 바이어스를 정상적으로 인가할 수 있음을 입증하였다.

3.3 Sagnac 간섭계에 의한 초음파 감지
편광조절기에 의한 $\pi/2$ 위상 바이어스의 인가

및 이의 확인 방법이 확립됨에 따라 Sagnac 간섭계를 이용한 비접촉식 초음파 센서를 이용하여 초음파 감지를 수행하였다. 펄서를 구동하여 초음파 탐촉자가 진동하게 하고, 펄서가 제공하는 동기 신호를 오실로스코프에 입력하여 외부 동기 신호로 사용한다. 시준기를 통해 광섬유를 빠져 나간 레이저 빔은 탐촉면 수직변위를 경험하고, 탐촉면에서 반사된 빔은 시준기로 다시 입사되며, 최종적으로 광검출기에서 초음파 변위를 위상변화에 따른 간섭 강도변화의 형태로 감지한다. 광검출기에서 얻어진 신호에 적당한 대역 필터를 적용하여, 신호대 잡음비를 개선하였다.

Fig. 10은 상용 1MHz 탐촉자 탐촉면의 초음파 진동을 Sagnac 간섭계가 감지한 결과 신호이다. 펄서에서 발생하는 내부 동기 신호를 기준으로 탐촉자에 수백 볼트 전압의 전기적 펄스가 가해지는데, 이를 메인 방(main bang)이라 한다. Fig. 10은 메인 방 신호 시작점과 고압의 전기적 펄스에 의한 전형적인 탐촉면의 진동 신호를 나타내고 있다. 실제로 메인 방 신호는 고전압으로 인해 오실로스코프 상에서 관찰할 수는 없다. 그러나, 이러한 고압 펄스 신호는 필터와 같은 계측 장비에는 전자기적 노이즈 형태의 신호로 유입되는데, 이를 오실로스코프에서 관찰하여 (a)에 나타내었다. (a)에 제시된 신호의 크기는 사실상 별 의미가 없고, 다만, 메인 방이 가해지는 시점에 대한 정보만 제공하기 위해 그래프에 표시하였다. 고압 펄스에 의한 초음파 탐촉면의 진동을 감지한 Sagnac 간섭계의 전형적인 출력신호를 (b)에 제시하였다. (c)에서 얻어진 깨끗한 초음파 파형은, (b)에서 제시한 것과 같은 전형적인 1000개의 연속적인 초음파 신호를 오실로스코프에서 합산하여 평균을 산출함으로써 신호 대 잡음비를 크게 개선한 것이다. (b)와 (c) 모두 고압펄스에 의해 필터에 실린 전자기적 노이즈를 포함하고 있다. 이는 매우 짧은 시간에 큰 전압의 변화가 발생하는 펄스에 의해 필터가 영향을 받는 본질적인 현상이다. 실험에 사용된 1.0MHz 초음파 탐촉자는 1회 전기 펄스에 대해 대략 5 사이클의 진동을 겪고 있음을 알 수 있다. 탐촉면 초음파 변위 신호의 검증을 위해, 초기 진동 신호를 추출하여 평균을 산출하고, FFT 분석을 수행하여 Fig. 11에 제시하였다. Fig. 11 (a)는 Fig. 10의 전형적인 초음파 신호의 초기 탐촉자 진동에 해당

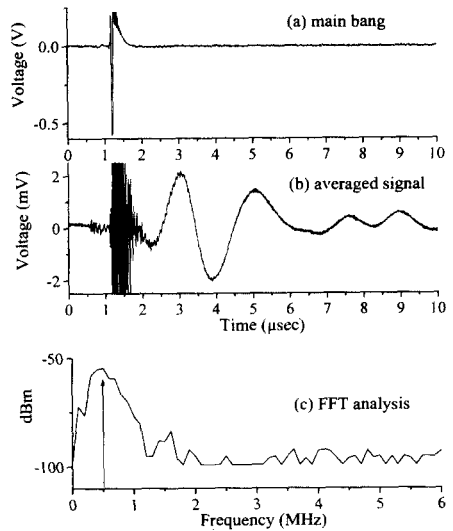


Fig. 12 Detection of Ultrasonic waves produced by conventional 0.5MHz transducer

하는 일부분을 표시한 것이다. (b)는 (a)와 같은 1000회의 연속적인 초음파 신호의 평균 신호이고, 이 신호를 FFT 분석하여 (c)에서 제시된 스펙트럼을 얻었다. 초음파 탐촉면의 진동은 1MHz에서 지배적임을 알 수 있다. 본 연구에서 구성된 Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서는, 메인 방 펄스에 의한 1MHz 초음파 탐촉자의 초음파 진동 특성을 정확히 감지하였음을 입증한 것이다.

초음파 광섬유 센서의 성능을 입증하기 위해, 또 다른 초음파 탐촉자에 대한 초음파 감지 실험을 수행하였다. 0.5MHz 초음파 탐촉자에 대해 역시 동일한 과정의 실험을 수행하고, 그 결과를 Fig. 12에 제시하였다. (a)는 메인 방의 인가 시점을 나타내고 있다. (b)는 전형적인 초음파 신호를 합산 평균한 신호를 나타내고 있는데, 대역 통과 필터를 거치면서, 메인 방 신호에 의한 노이즈가 유입된 것을 관찰할 수 있다. 또한 초음파 신호 전압 수준이 1MHz 초음파 감지 실험에서보다 상대적으로 작음을 알 수 있다. (b)의 초음파 신호를 FFT 분석하여 (c)에 제시하였다. 역시 주파수 성분은 0.5MHz에서 지배적임을 알 수 있다. 따라서, 이 실험에서도 Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서는 초음파 탐촉면의 0.5MHz 진동 특성을 잘 감지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11과 Fig 12에서 Sagnac 간섭계가 감지한 1MHz와 0.5MHz 초음파 신호 크기를 관찰하면, 1MHz 초음파 신호가 더 크다는 사실을 발견할 수 있다. 광검출기에서 측정된 간섭 강도 신호는 식 (7)에 의해 탐측면의 초음파 변위의 크기에 비례한다. 그러나 Fig. 5를 통해 언급한 바대로, Sagnac 간섭계의 위상 반응도가 주파수에 따라 변화한다. 이 때문에 0.5MHz 초음파 신호의 크기가 상대적으로 더 작은 것으로 고려된다. 주파수 대역이 넓은 초음파 신호에서는 신호크기가 주파수에 따라 변화될 수 있으므로, 간섭 강도 신호는 초음파 변위 크기에 정비례한다고 판단하기 어려울 수 있다. 그러나, 주파수 대역 폭이 상대적으로 매우 작은 상용 초음파 탐상에서는 주파수 의존성이 상대적으로 작으므로, 크게 문제되지 않는다. 또한 Sagnac 간섭계는 상용 PZT 센서에 비해 허용 주파수 대역이 상대적으로 더 넓어서, 비교적 넓은 범위 주파수의 초음파 감지에 탁월하다고 판단된다. 결과적으로, Sagnac 간섭계를 이용한 초음파 센서는 비접촉식 초음파 탐지에 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 광섬유로 구성된 Sagnac 간섭계를 초음파 탐지에 적용하였다. 탐침 역할을 하는 광섬유의 끝단에 시준기를 부착하여, 시편 표면의 초음파 변위를 비접촉식으로 측정할 수 있도록 구성하였다. Sagnac 루프 내 서로 반대 방향으로 진행하는 두 빛간의 위상 바이어스를 인가하기 위해 편광조절기를 사용하였다. 루프 내 설치된 하나의 광섬유 편광조절기에 의해 광경로의 복굴절을 적당히 조절하여 $\pi/2$ 위상 바이어스를 안정적으로 인가하였다. 위상변조와 편광조절을 행하면서 출력파형의 관찰을 통해 인가된 위상 바이어스를 검증하는 방법을 제안하였다. 편광조절기를 이용한 안정적인 $\pi/2$ 위상 바이어스 인가를 실험적으로 입증하고, 별도의 복잡한 신호처리 과정이 없는 초음파 감지 시스템을 구성하였다. 단일 주파수의 초음파 변위에 대한 광검출기에서의 간섭 강도 출력은 초음파 크기에 비례한다. 상용 초음파 탐측자의 탐측면 진동을 Sagnac 간섭계를 이용하여 감지하고, 주파수 분석을 통해 초음파 감지가 정확히 이루어짐을 확인하였

다. 넓은 주파수 대역의 초음파 감지 신호로부터 실제 변위 성분을 산출하는 과정에 대한 연구가 향후 이루어져야 한다. Sagnac 간섭계는 비접촉식 초음파 감지에 매우 효과적이며, 표면 탄성과 및 비파괴 평가 분야에서 적용 가능성이 매우 높다고 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업과 제인 “고도화된 비파괴센싱 기술개발에 의한 상태진단 기술의 선진화 연구(과제번호: 2000-N-NL-01-C-091)”의 일환으로 수행되었으며, 이에 대하여 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Scruby, C.B. and Drain, L.E., 1990, *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*, Adam Hilger, New York.
- (2) Rastogi, P.K. and Inaudi, D., 2000, *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection*, Elsevier, Oxford.
- (3) Cho, H., Ogawa, S. and Takemoto, M., 1996, “Non-contact Laser Ultrasonics for Detecting Subsurface Lateral Defects,” *NDT & E International*, Vol. 29, No. 5, pp. 301~306.
- (4) Fomitchov, P., Steckenrider, J.S., Krishnaswamy, S. and Achenbach, J.D., 1997, “Frequency- shifted Low-noise Sagnac Sensor for Ultrasonic Measurements,” *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 16, Edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, pp. 2053~2060.
- (5) Mitra, B., Shelamoff, A. and Booth, D.J., 1998, “An Optical Fibre Interferometer for Remote Detection of Laser Generated Ultrasonics,” *Measurement Science & Technologies*, Vol. 9, pp. 1432~1436.
- (6) Fomitchov, P., Krishnaswamy, S. and Achenbach, J.D., 1998, “Sagnac Interferometer for Ultrasound Detection on Rough Surfaces,” *Nondestructive Characterization of Material VIII*, Edited by Robert E. Green Jr., Plenum Press, New

- York, pp. 97~103.
- (7) 김경조, 山脇 壽, 장경영, 2000, "마이켈슨 간섭계를 이용한 레이저 여기 초음파의 검출," 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 1, pp. 27~32.
- (8) Fomitchov, P., Kromine, A.K., Krishnaswamy, S. and Achenbach, J.D., 2000, "Sagnac-type Fiber-optic Array Sensor for Detection of Bulk Ultrasonic Waves," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 47, No. 3, pp. 584~590.
- (9) Udd, E., 1990, *Fiber Optic Sensors*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (10) 권일범, 강현규, 김천곤, 홍창선, 1998, "3×3 수동변조 되풀이 광섬유 마이켈슨 간섭센서에 의한 구조물의 변형률 측정," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제1호, pp. 80~89.
- (11) 이상열, 정재강, 1998, "표면부착 광섬유센서를 사용한 변형률-온도의 동시측정," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제5호, pp. 895~901.
- (12) 김정석, 윤형규, 설재수, 1999, "실험을 통한 소형 고감도 광섬유 하이드로폰의 감지성능 연구," 한국소음진동공학회지, 제9권 제6호, pp. 1152~1156.
- (13) 류치영, 구본용, 홍창선, 2000, "스마트 구조물의 변형률 모니터링을 위한 광섬유 브래그 격자 센서 시스템 개발에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제28권 제4호, pp. 58~66.
- (14) Gottwald, E. and Pietzsch, J., 1988, "Measurement Method for Determination of Optical Phase Shifts in 3×3 Fiber Couplers," *Electronics Letters*, Vol. 24, No. 5, pp. 265~266.
- (15) Dandridge, A., Wang, C.C., Tveten, A.B. and Yurek, A.M., 1994, "Performance of 3×3 Couplers in Fiber Optic Sensor Systems," *Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering*, Vol. 2360, pp. 549~552.
- (16) 남성현, 2000, "Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 음향 센서의 동적 범위 향상 기법," 센서학회지, 제9권 제6호, pp. 416~423.
- (17) 이왕주, 1999, 편광 의존성을 없앤 이중 주파수 헤테로다인 간섭계형 광섬유 센서어레이에 대한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문.
- (18) 한기호, 이왕주, 김병윤, 1998, "광섬유 Sagnac 간섭계 수증음향센서어레이의 특성 조사 및 신호처리," *Proceedings of Photonics Conference '98*, pp. 119~120.
- (19) Moss, B.C. and Scruby, C.B., 1988, "Investigation of Ultrasonic Transducers Using Optical Techniques," *Ultrasonics*, Vol. 26, No. 4, pp. 179~188.