

Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이

양진성 · 김명욱 · 이상배 · 조재철 · 최상삼
한국과학기술연구원 응용광학연구실

(1990년 7월 4일 받음)

구성이 간단하고 시스템화 하기에 용이한 시간분할(TDM)방식 Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이를 구성하고 다점계측에의 응용 가능성을 보였다. 세 개의 감지부분을 갖는 Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이에 광펄스를 입사시키고 각 광섬유 센서로부터 시간에 따라 되돌아오는 신호 광펄스들을 검출하기 직전에 Mach-Zehnder 간섭계 형태의 보상 간섭계를 두어 각 광섬유 간섭센서 부분에서의 외부 영향에 따른 위상변화를 관찰하였다.

I. 서 론

광섬유 센서는 전자기적 간섭에 영향을 받지 않고 감도가 높으며, 소형·경량이고 전기적 안전장치의 불필요성 등의 많은 장점을 갖고 있기 때문에 보통의 센서가 사용될 수 없는 위험한 장소나 고감도를 요하는 특수 목적에 효과적으로 사용될 수 있으며, 특히 계속하고자 하는 물리량의 변화를 간섭신호의 위상변화로써 감지하는 광섬유 간섭센서는 감도가 가장 높기 때문에 이를 이용해 온도, 압력, 회전, 음향신호 등을 계측하기 위한 연구가 여러 방면에 걸쳐 진행되고 있다.^(1,2)

최근에 이러한 광섬유 간섭센서를 어레이 형태로 구성하여 여러 가지 물리량의 변화, 또는 여러 장소에서 일어나는 한 가지 물리량의 변화를 동시에 계측하고자 하는 Multiplexing에 대한 연구가 활발히 행하여지고 있다.^(3,4) 일반적으로 광섬유 간섭센서를 이용해 N 개의 물리량을 계측하거나 N 개 장소의 물리량을 계측하기 위해서는 N 개의 센서가 필요하며, 따라서 많은 수의 광학적·전기적 소자들 즉, 광원, 검지기, 변조기, 광섬유 결합기 등이 필요하고 센서의 수가 증가할수록 더 많은 수의 광학적·전기적 소자들이 필요하게 된다. 이에 반하여 광섬유 간섭센서 어레이는 광섬유 간섭센서의 장점을 유지하는 동시에 광학적·전기적 소자들을 공유해서 쓰고 센서들을 하나의 광섬유 bus에 모아 연결

함으로써 여러 물리량을 측정할 수 있기 때문에 비용이 훨씬 절감되고, 여러 개의 센서를 개별적으로 사용할 때 보다 소자의 수가 감소되며, 시스템을 구성하기에 용이하므로 제조공장, 화학공장 등의 공정제어나 다점계측(multipoint measurement) 등에 유용하게 응용될 수 있다.

이러한 광섬유 간섭센서 어레이는 Multiplexing 방법에 따라 Time-Division Multiplexing(TDM), Frequency-Division Multiplexing(FDM), Wavelength-Division Multiplexing(WDM) 등으로 나눌 수 있다. 이 가운데 TDM 방식 광섬유 간섭센서 어레이는 시간에 따라 진폭 변조된 빛살이 각각 다른 시간에 여러 센서들을 거치게 되고, 따라서 그 출력도 각각 다른 시간에 출력 광섬유 bus를 지나 검지기에 도달하게 되는 원리를 이용한 것이다. 최초의 TDM 방식 광섬유 간섭센서 어레이는 Fabry-Perot 간섭계형 어레이로써 시도되었다.⁽⁵⁾ 이 방식은 구성이 매우 간단하다는 장점이 있지만 가간섭성(coherence) 길이가 매우 긴 광원을 요하고 intrinsic crosstalk level이 높기 때문에 유용한 방법이 못되며,⁽³⁾ 최근에는 센서 어레이의 출력단에 보상 간섭계를 두어 신호처리가 용이하고 보다 효율적인 Ladder 어레이,⁽⁶⁾ Tapped Serial Array⁽⁷⁾ 등이 보고 되었다.

본 논문에서는 기존의 TDM 방식 광섬유 간섭센서 어레이의 단점을 보완하기 위하여 TDM 방식의 Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이를 제안하였다. Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이는 기존의 Mach-Zehnder 간섭계 형태 등의 TDM 방식 광섬유 간섭센서 어레이보다 구성소자의 수가 적고, 구성

본 연구는 과학기술처의 지원에 의해 수행되었고 게재료 일부를 한국과학재단 레이저 장려 연구센터의 보조를 받았다.

이 간단하며, 시스템화 하기에 용이한 장점을 갖는다. 이를 이용해 세 개의 감지부분을 갖는 Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이를 구성하고 각 광섬유 간섭센서 부분에서의 외부 영향에 따른 위상변화를 관찰하였다.

II. 구성원리 및 이론

그림 1과 같이 n 개의 광섬유 결합기를 ΔT 의 시간 간격을 두어 연결하고 각 결합기의 분지되는 광섬유 가지에 mirror를 부착하여 광섬유 Michelson 간섭계의 어레이를 만들고 펄스 주기가 τ 인 광펄스를 입사시킨다. 입사된 광펄스는 각각의 결합기에서 결합기의 결합비율 만큼의 양이 coupling 되고, coupling 된 광펄스는 mirror에서 반사되어 결합기를 거쳐 출력 광섬유 bus로 진행한다. 이때, mirror와 mirror 사이의 시간 간격 ΔT 를 광펄스의 폭과 같게 하면 하나의 입사 광펄스에 대하여 펄스들간의 시간 지연이 $2\Delta T$ 인 $n+1$ 개의 광펄스 train이 만들어진다. 이 펄스의 train은 긴 arm이 짧은 arm에 대하여 $2\Delta T$ 의 시간 지연을 갖는 Mach-Zehnder 간섭계 형태의 보상 간섭계를 지나면 $n+2$ 개의 광펄스가 발생하고 경로는 다르나 같은 노정(optical path length)을 지난 이웃하는 mirror에서 반사된 광펄스끼리 간섭이 일어나게 된다. 따라서 처음과 마지막 광펄스를 제외한 n 개의 간섭신호는 각 센서의 위상정보를 포함하게 된다.

간섭센서 어레이의 모든 센서들의 감도를 균일하게 해주기 위해서는 각 mirror에서 반사되어 되돌아 오는 광펄스들의 세기가 보상 간섭계를 거치기 전에 서로 같아야 한다. 이를 위해서는 광섬유 결합기들의 결합계수를 알맞게 정해주어야 한다. 그림 1에서 각 결합기의 광손실이 $(1-\alpha_c^2)$ 으로 모두 같고, splicing 손실이 $(1-\alpha_s^2)$ 으로

로 각 지점에서 같다고 하면, 반사율이 R_0 인 첫번째 mirror에서 반사된 광펄스의 returned power $P_{0,r}$ 과 반사율이 R_j 인 j 번째 mirror에서 반사된 returned power $P_{j,r}$ 은 각각 다음과 같다.

$$P_{0,r} = \alpha_0^4 \alpha_c^4 \alpha_s^4 R_0 P_{in} \quad (1)$$

$$P_{j,r} = \alpha_0^2 (1 - \alpha_0^2) \alpha_j^4 \alpha_c^{4(j+1)} \alpha_s^{4(j+1)} \cdot \left\{ \prod_{i=1}^{j-1} (1 - \alpha_i^2) \right\} R_j P_{in}, \quad j=1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

여기서 α_0 는 첫번째 결합기의 결합계수(coupling coefficient)이고 α_j 는 j 번째 결합기의 결합계수이다. Returned power가 같기 위해서는 $P_{j,r} = P_{j+1,r}$ 을 만족해야 하므로 반사율이 R_0 인 첫번째 mirror를 제외한 나머지 mirror의 반사율은 R 로서 같다고 하고 $P_{j,r} = P_{j+1,r}$ 을 이용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\alpha_j^2 = \frac{\alpha_s^2 \alpha_c^2 \alpha_{j+1}^2}{1 + \alpha_s^2 \alpha_c^2 \alpha_{j+1}^2} \quad j=1, 2, \dots, n-1 \quad (3)$$

한편, 마지막 가지 다음에는 결합기가 필요치 않으므로 $\alpha_n^2 = 1$ 이고 이것을 (3)식에 대입하여 정리하면

$$\alpha_j^2 = \frac{(\alpha_s \alpha_c)^{2(n-j)}}{\sum_{k=0}^{n-j} (\alpha_s \alpha_c)^{2k}} \quad j=1, 2, \dots, n-1 \quad (4)$$

을 얻는다. 또한, 분모는 등비 급수의 합이므로, returned power가 같기 위한 j 번째 결합기의 결합계수 α_j 는 시스템의 광손실이 없을 경우($\alpha_s^2 = \alpha_c^2 = 1$)와 손실이 있을 경우($\alpha_s^2 \neq 1, \alpha_c^2 \neq 1$)에 각각 다음과 같다.

$$\alpha_j = \frac{1}{n-j+1}, \quad \alpha_s^2 = \alpha_c^2 = 1 \quad (5)$$

$$\alpha_j = \frac{1 - (\alpha_s \alpha_c)^2}{(\alpha_s \alpha_c)^{2(j-n)} - (\alpha_s \alpha_c)^2}, \quad \alpha_s^2 \neq 1, \alpha_c^2 \neq 1 \quad (6)$$

이다. 또한, $P_{1,r} = P_{j,r}$ 이므로 returned power $P_{j,r}$

$$P_{j,r} = \frac{R}{n^2} \alpha_0^2 (1 - \alpha_0^2) P_{in}, \quad \alpha_s^2 = \alpha_c^2 = 1 \quad (7)$$

$$P_{j,r} = \alpha_0^2 (1 - \alpha_0^2) \alpha_s^8 \alpha_c^8 \left[\frac{1 - (\alpha_s \alpha_c)^2}{(\alpha_s \alpha_c)^{2(1-n)} - (\alpha_s \alpha_c)^2} \right]^2 R P_{in}, \quad \alpha_s^2 \neq 1, \alpha_c^2 \neq 1 \quad (8)$$

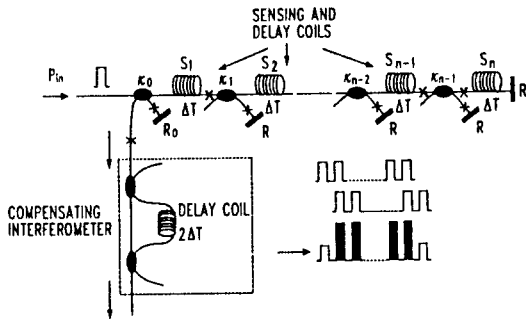


그림 1. Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이의 구성원리. × ; splicing point

한편, $\alpha_0^2(1-k_0^2)$ 는 α_0^2 이 1/2일 때 최대 이므로 $\alpha_0^2=1/2$ 로 하면 returned power $P_{j,r}$ 은 다음과 같다.

$$P_{j,r} = \frac{R}{4n^2} P_{in}, \quad \alpha_s^2 = \alpha_c^2 = 1 \quad (9)$$

$$P_{j,r} = \frac{1}{4} \alpha_s^4 \alpha_c^4 \left[\frac{1 - (\alpha_s \alpha_c)^2}{(\alpha_s \alpha_c)^{2(1-n)} - (\alpha_s \alpha_c)^2} \right]^2 R P_{in}, \quad \alpha_s^2 \neq 1, \quad \alpha_c^2 \neq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (10)$$

따라서, $P_{o,r}$ 과 $P_{j,r}$ 가 같기 위한 R_0 는 다음과 같다.

$$R_0 = \frac{R}{n^2}, \quad \alpha_s^2 = \alpha_c^2 = 1 \quad (11)$$

$$R_0 = \alpha_s^4 \alpha_c^4 \left[\frac{1 - (\alpha_s \alpha_c)^2}{(\alpha_s \alpha_c)^{2(1-n)} - (\alpha_s \alpha_c)^2} \right]^2 R, \quad \alpha_s^2 \neq 1, \quad \alpha_c^2 \neq 1 \quad (12)$$

III. 실험방법 및 결과

앞서 설명한 원리를 이용하여 세 개의 sensing 부분을 갖는 Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이를 구성하여 실험하였다. 그림 2에서 실험장치도를 나타내었다. 광원으로는 파장이 0.6328 μm , 최대 출력이 4mW인 He-Ne 레이저를 사용하였고 음향광학 변조기(acousto-optic modulator)를 써서 시간폭이 200ns, 펄스주기 τ 가 2.2 μs 인 광펄스를 발생시킨 후 현미경 대물렌즈로 집속하여 0.6328 μm 에서 단일 모드인 matched type의 광섬유에 입사시켰다.

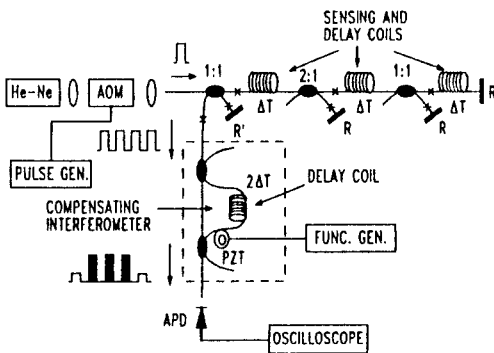


그림 2. Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이의 실험장치도. AOM ; 음향광학 변조기, × ; splicing point

입사된 광펄스는 각 결합기에서 그의 power가 나누어진 후 네 개의 mirror에서 반사되어 각 광펄스 사이의 시간 간격이 $2\Delta T$ 인 네 개의 광펄스가 만들어지는데, 본 실험에서는 mirror와 mirror 사이의 광섬유의 길이를 40m로 해줌으로써 각 펄스간의 시간 간격 $2\Delta T$ 는 400ns가 되었다. 이 때, 시스템의 위상 noise를 최소화 하기 위해 광섬유 길이를 5cm 내에서 같게 맞추어 주었다. 또한 각 센서의 감도를 높고 균일하게 하기 위해서는 앞에서 설명한 바와 같이 돌아오는 광펄스의 세기를 같게 만들어야 하는데 이를 위하여 본 실험에서는 시스템을 광손실이 없는 시스템으로 가정하고 식 (5)에 의하여 광섬유 결합기의 결합비율이 각각 1/2, 1/3, 1/2인 결합기를 썼고, mirror는 $R=99\%$, $R_0=R/10$ 의 반사율을 갖는 mirror를 사용하였다. 이 경우에 실제로는 결합기의 손실, 접속손실 등의 광손실이 존재하므로 결합기와 mirror와의 접속점에서 접속손실을 적절히 조절하여 되돌아 오는 광펄스의 세기가 비슷하도록 하였다. 실험에 사용한 광섬유 결합기는 tapering-fusion 법으로 본 연구실에서 만든 fused-type 결합기로써 약 0.2dB의 광손실이 있었다.

이러한 광섬유 센서 어레이를 구성하기 위해서는 광섬유와 광섬유의 접속이 필수적인데, 광섬유의 접속법에는 connector를 사용하는법, capillary tube를 사용하는법, 전기적 arc를 이용해 녹여 붙이는 fusion splicing법 등이 있고, 이 가운데 접속의 지속성을 유지하고 광손실을 적게하기 위해서는 fusion splicing법이 가장 적합하다. 본 실험에서는 fusion splicing법을 써서 0.3dB 정도의 접속손실로서 광섬유를 접속시켰다. 또한, 각 결합기에서 분지되는 광섬유에 반사율을 높이기 위해 다음과 같은 방법으로 mirror를 부착하였다. 먼저, 광섬유의 피복을 적당량 벗기고 클래딩의 직경보다 약간 큰 내경을 갖는 capillary tube에 넣고 예폭시로 고정시킨다. 다음에 광섬유가 고정되어 있는 capillary tube에 에폭시를 바르고 내경이 capillary tube의 외경보다 조금 큰 유리 원통에 삽입하고 굳힌 후 lapping과 polishing을 하고 mirror를 붙여 완성한다. 그림 3은 보상 간섭계를 지나기 전의 하나의 입력 광펄스에 대하여 각 센서를 거쳐 mirror에서 반사되어 돌아온 네 개의 광펄스 train이다. 광펄스들은 폭이 200ns, 펄스간 시간 지연이 400ns임을 알 수 있다.

각 mirror에서 반사된 400ns의 시간 간격을 갖는 네 개의 광펄스들은 보상 간섭계를 거치게 되는데 보상 간섭계의 긴 arm을 짧은 arm에 대하여 $2\Delta T$ 즉, 400ns의 시간 지연을 갖게 해주면 경로는 다르나 같은 노정

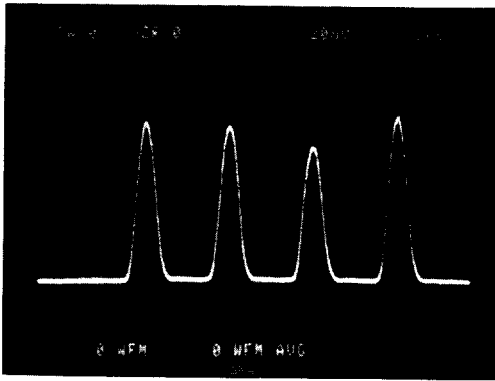
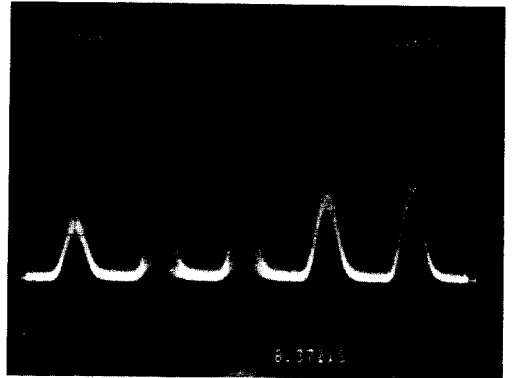


그림 3. 보상 간섭계를 지나기 전의 광펄스 train.



(a)

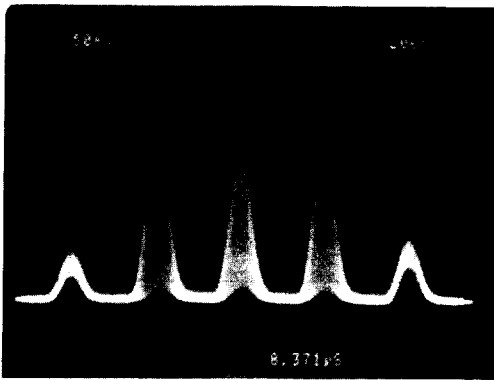
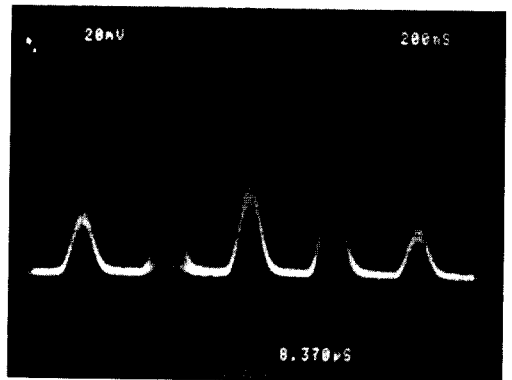


그림 4. 보상 간섭계를 지난 후의 출력신호.



(b)

(optical path length)을 지난 이웃하는 mirror에서 반사된 광펄스간에 간섭이 일어나게 된다. 이를 위하여 보상 간섭계의 길이차를 약 80m로 하였으며, 간섭의 visibility를 높이기 위하여 보상 간섭계의 결합기는 3 dB 결합기를 사용하였다.

시스템의 visibility를 확인하기 위하여 보상 간섭계의 한쪽 arm에 PZT를 이용해 위상변조시켰다. 이 때, 겹치는 두 광펄스간의 광경로가 잘 일치하고 크기가 같다면 위상 noise는 최소가 되고 visibility는 최대가 될 것이다. 위상변조 시켰을 때의 출력신호를 그림 4에 나타내었다. 처음과 마지막 광펄스는 겹치지 않으므로 간섭이 일어나지 않고 나머지 세 개의 광펄스들은 같은 노정을 지난 펄스끼리 간섭이 일어남을 보여준다. 또한, 간섭신호의 진폭 변화가 큰 것으로 보아 시스템의 visibility가 상당히 좋은 것을 알 수 있다. 첫번째 간섭신호는 반사율이 R_0 인 첫번째 mirror와 반사율이 R 인 두번째 mirror에서 반사된 광펄스들 간의 간섭신호로서

그림 5. 각기 다른 센서에 온도변화를 주었을 때의 출력신호. (a) 첫번째(S_1)와 두번째(S_2) 센서에 온도변화를 주었을 때, (b) 첫번째(S_1) 센서에 온도변화를 주었을 때.

첫번째 센서 S_1 의 위상정보를 포함하고 있으며, 두번째와 세번째 간섭신호는 각각 S_2 와 S_3 의 위상정보를 포함하고 있다. 그림 5는 보상 간섭계의 PZT에 전압을 가하지 않고 각기 다른 센서에 온도변화를 주었을 때의 출력신호이다. 그림 5(a)는 첫번째와 두번째 센서에 온도변화를 가해주었을 때의 출력신호이고, 그림 5(b)는 첫번째 센서에만 온도변화를 주었을 때의 출력신호이다. 이 때 각각의 간섭신호는 각 센서의 온도변화에 대한 정보를 포함하고 있다. 그림 5(b)의 네번째 펄스도 약간 간섭이 일어나는데, 이는 온도변화를 가할 때 센서와 센서의 isolation이 완전하지 않았기 때문으로 생각된다.

IV. 결 론

상변화를 감지하는 연구가 계속될 것이다.

참 고 문 헌

기존의 TDM 방식 광섬유 간섭센서 어레이보다 구성 소자의 수가 적고 구성이 간단하며, 시스템화 하기에 용이한 세 개의 센싱 부분을 갖는 TDM 방식의 Michelson 간섭계형 광섬유 간섭센서 어레이를 구성하고 외부 영향에 따른 각 센서부분의 위상변화를 관찰하였다. 폭이 200 ns, 펄스 주기가 2.2 μs 인 광펄스를 입사시켰을 때, 각 mirror로부터 반사되어 되돌아오는 폭이 200 ns, 펄스간 시간 지연이 400 ns 인 네 개의 광펄스를 확인 하였으며, mirror와 mirror 사이의 시간 간격과 보상 간섭계 두 arm 간의 시간 간격을 정확히 맞추어 줌으로써 visibility가 큰 간섭신호를 얻을 수 있었다.

본 연구결과를 토대로 앞으로 각 센서부분의 외부 영향에 따른 위상변화를 실지로 계측하고, 시간에 따라 되돌아오는 광펄스들을 분리하여 동시에 여러 센서들의 위

[1] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge et al., IEEE J. Quantum Electron. **QE-18**, 626 (1982).
 [2] J. Dakin, B. Culshaw, "Optical Fiber Sensors" Vol. I and Vol. II, Artech House, Boston (1988).
 [3] A. D. Kersey, A. Dandridge and A. B. Teven, Proc. SPIE **838**, Fiber-Optic and Laser Sensor V, 184 (1987).
 [4] R. Kist, Proc. 3rd Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS '86), 209 (1986).
 [5] A. D. Kersey, D. A. Jackson and M. Corke, Optics and Lasers in Engineering, **5**, 141 (1984).
 [6] J. L. Brooks, B. Moslehi, B. Y. Kim and H. J. Shaw, J. Lightwave Technol., **LT-5**, 1014 (1987).
 [7] A. D. Kersey, A. Dandridge and K. L. Dorsey, J. Lightwave Technol., **LT-7**, 846 (1989).

Time-Division Multiplexing(TDM) of Michelson type Fiber-optic Interferometric Sensor Arrays

Jin Seong Yang, Myong Wook Kim, Sang Bae Lee, Jae Cheol Jo and Sang Sam Choi
Applied Optics Lab., Korea Institute of Science and Technology

(Received: July 4, 1990)

One method for time-division multiplexing (TDM) of Michelson type fiber-optic interferometric sensor arrays is proposed and demonstrated experimentally. This method has some advantages; fewer fiber-optic components, low cost, and high reliability.