

광섬유 간섭계형 센서 어레이의 구성 및 특성 조사*

안준태 · 김병윤

한국과학기술원 물리학과

(1994년 1월 24일 받음)

감지부에 두개의 간섭계형 센서가 있고 원격측정이 가능한 광섬유센서 어레이를 구성하였다. 각 센서의 신호를 분리 측정하기 위하여 짧은 광펄스를 광원으로 하는 시간분할방식의 신호처리를 도입하였다. 센서의 측정감도는 수 kHz 영역에서 $40\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 였고, 센서간의 cross talk은 -50 dB 이하였다.

I. 서 론

빛이 광섬유를 진행하는 동안 외부물리량의 영향을 받으면 빛의 세기, 위상과 편광 등이 변하는데 이렇게 변조된 빛을 광검출기로 받아 신호처리함으로써 외부물리량을 측정하는 것이 광섬유 센서의 일반적인 원리이다. 광섬유 센서는 광원, 광섬유로 구성된 광학계 및 신호처리장치로 이루어진다. 광섬유 센서를 사용해서 N 개의 물리량을 측정하는 가장 단순한 방법은 N개의 독립된 센서를 사용하는 것인데 이 경우에 광원과 광섬유 그리고 신호처리장치가 각각 N개씩 필요하게 된다. 만약 한개의 광원과 한개의 신호처리장치로써 N개의 광섬유 센서를 동작시킨다면 광원과 신호처리장치를 줄일수 있어 비용을 절감할 수 있을뿐 아니라 부피를 줄일 수 있고 효율적으로 사용할 수 있다. 광섬유 센서의 이와 같은 기능을 다중화(multiplexing) 기능이라고 하며 광섬유 센서를 기존의 전기적 센서와 구분되게 하는 독특한 장점중의 하나이다.

센서 어레이(sensor array)의 일반적인 구조는 그림 1과 같다. 센서 어레이는 기능상 광섬유 센서와 원격 측정을 결합한 것으로서 lead라고 부르는 입, 출력광섬유가 감지부(array head)를 광원과 신호처리장치에 연결해 준다. 감지부가 간섭계로 이루어진 센서 어레이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 연구의 주된 관심은 센서 사이의 cross talk이 작고 간섭계가 한개일 때와 동일한 감도를 유지하면서 가능한 많은 센서를 구동할 수 있는 센서 어레이의 개발이다. 신호처리장치로 들어

가는 신호광에는 감지부의 여러 센서로부터 나온 신호가 섞여있게 되는데 이렇게 섞여있는 신호중에서 특정 센서의 신호를 구분해 내는 방법에 따라 센서 어레이는 time division multiplexing(TDM), frequency division multiplexing(FDM), coherence multiplexing 그리고 wavelength division multiplexing(WDM) 등으로 분류된다.^[1] 그 중에서 TDM^[2]과 FDM^[3]이 센서 어레이를 구현하기에 적합한 것으로 주목받고 있다.

본 논문에서는 감지부에 두개의 Mach-Zehnder 간섭계형 센서가 있는 TDM 방식의 센서 어레이를 구성하여 측정감도와 cross talk 등 광섬유 간섭계형 센서 어레이의 일반적인 특성을 조사하였다. 2장에서는 TDM 방식 센서 어레이의 원리와 구조에 대해서 알아보고 3장에는 실험 장치 및 실험결과에 대해서 기술하고 4장에서 논문을 요약함으로써 결론을 맺었다.

II. TDM 방식 광섬유 간섭계 어레이

TDM은 기본적으로 짧은 광펄스를 사용하는 것으로서 광펄스를 입력광섬유에 입사시키면 감지부에 있는 각 센서들을 지나서 신호처리장치까지 도달하는데 걸리는 시간이 서로 다른 점을 이용해서 특정 센서의 신호를 분리해 내는 방식이다. 그림 2처럼 감지부에 한개의 센서만이 있는 가장 기본적인 구조의 센서 어레이를 통해서 TDM의 기본원리를 알아보자. 여기서 사용된 간섭계는 광통로간의 광경로차(또는 시간차 ΔT)가 매우 큰 unbalanced Mach-Zehnder 간섭계이다.

광원에서 광섬유로 입사된 광펄스는 첫번째 unbalanced Mach-Zehnder 간섭계를 지난 뒤에 간섭계의 광경

* 본 연구는 국방과학연구소의 장기기초연구비 지원(90-1-1)으로 수행되었음.

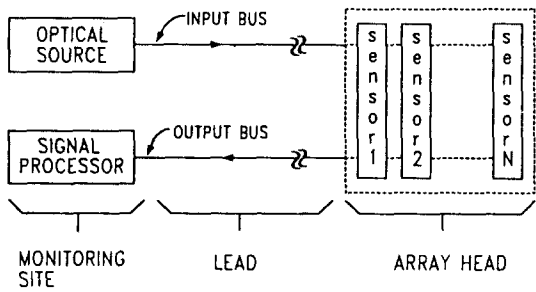


그림 1. 센서 어레이의 일반적인 구조.

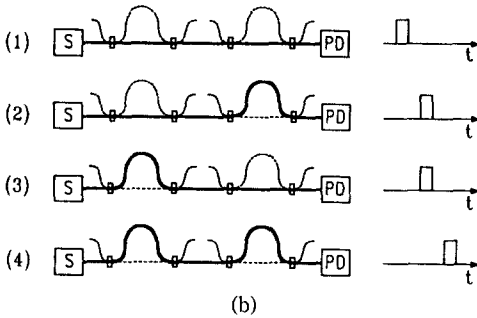
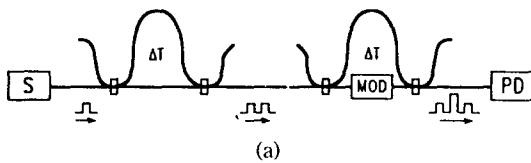


그림 2. (a) TDM의 기본 구조. (b) 4개의 광경로(실선)와 시간축상에 나타낸 각 경로의 출력펄스.

로차 ΔT 만큼의 시간차를 갖는 두개의 펄스로 나뉘어진다. 두 펄스간의 시간차 ΔT 가 각 펄스들의 펄스폭보다 더 크도록 unbalanced Mach-Zehnder 간섭계를 구성해야 한다. 이 두 펄스가 두번째 간섭계를 통과하면 각각 두개의 펄스들로 나뉘어져서 모두 네개의 펄스로 된다. 그림 2-b는 광펄스 하나가 두개의 간섭계를 진행하면서 네개의 펄스로 나뉘어지는 광경로인데 실선이 광경로를 나타낸다. 만약 두 간섭계 사이의 시간차 ΔT 가 같다고 하면 (2)와 같이 진행한 펄스와 (3)처럼 진행한 펄스는 같은 길이의 광경로를 진행했기 때문에 서로 겹쳐서 간섭을 한다. 그러나 (1)과 (4)처럼 두번 모두 짧은 경로를 지난 펄스와 긴 경로를 지난 펄스는 서로 분리되어 간섭이 생기지 않는다.

그림 2-b의 오른쪽은 네 펄스를 시간축상에 표시한 것인데 한개의 광펄스가 TDM의 기본구조에 입사되면

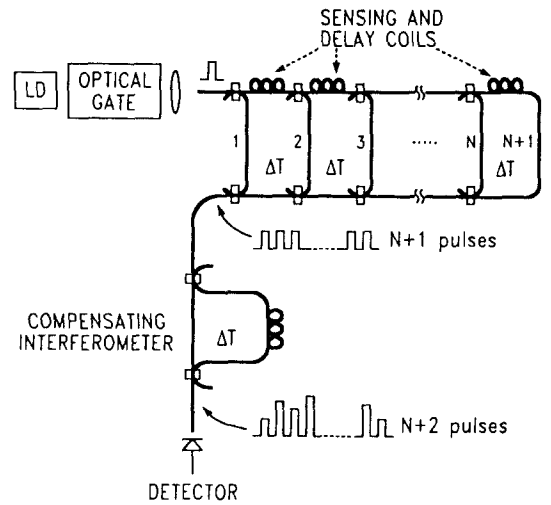


그림 3. 효율적인 TDM 센서 어레이의 구성.

간섭펄스 하나를 포함해서 모두 세개의 출력펄스가 나온다. 그 중에서 간섭을 일으킨 펄스만을 분리해 내서 간섭무늬 변화를 분석하면 위상변화를 일으킨 외부물리량을 측정할 수 있다. 그림 2-a의 두 unbalanced 간섭계 중에서 위상을 변조시킬 수 있는 위상변조기(MOD)가 있는 것을 보상간섭계라 하고 다른 것을 감지간섭계라고 부른다. 두 광로간의 광경로가 같은 한개의 간섭계를 감지부로 사용하지 않고, 두개의 unbalanced 간섭계를 사용하는 이유는 간섭계 센서의 신호처리에 필요한 모든 소자들(들)을 보상간섭계에 설치함으로써 감지부에는 어떠한 능동소자도 필요로 하지않는 수동형 원격측정(passive remote sensing)을 하기 위함이다. 이러한 센서 어레이의 측정감도를 좋게하기 위해서는 감지간섭계와 보상간섭계의 광경로차를 서로 같도록 해야한다. 왜냐하면 두 간섭계의 광경로차가 다를 수록 광원의 위상잡음(source phase-induced intensity noise)이 커지기 때문이다.^[4] 또한 TDM의 원리상 보상간섭계가 감지간섭계의 앞뒤 어디에 위치하든지 관계없음을 알 수 있다.

그림 3은 감지부에 N개의 간섭계가 있고 감지부와 보상간섭계로 이루어진 TDM방식 센서 어레이의 구조이다. 감지부의 모양이 사다리꼴과 비슷해서 사다리꼴 구조라고 부른다. 광원으로부터 빛을 받아 사다리꼴의 살로 빛을 나누어주는 광섬유를 입력버스라 하고 사다리꼴의 살을 지나온 빛을 보상간섭계로 실어나르는 광섬유를 출력버스라고 한다. 입력버스에 있는 지연광섬유(delay coil)는 각 살을 진행하는 광펄스 사이에 시간차를 줄뿐아니라 동시에 외부의 영향을 측정하는 감지광섬유

(sensing coil)의 역할도 한다. 감지부의 구조로 볼때 이 지연광섬유는 출력버스에 있어도 관계없다. 입출력버스에 있는 네모는 광섬유 방향성 결합기를 나타내는 것으로서 방향성결합기는 한쪽 광섬유에서 다른쪽 광섬유로 빛을 나누어 주는 광분할기의 역할을 한다. 그러므로 한개의 광펄스가 입력버스에 입사되면 입력버스를 진행하다가 각 방향성결합기에서 둘로 나뉘어 하나는 계속해서 입력버스를 진행하고 다른 하나는 사닥다리의 살을 진행한뒤 출력버스에있는 방향성결합기를 통해 출력버스로 결합되어 진행한다. 이때 서로 이웃하는 두 살을 포함하는 광통로가 unbalanced Mach-Zehnder 간섭계가 됨을 알 수 있다. 이 Mach-Zehnder 간섭계의 광경로차는 두 살 사이에 있는 지연광섬유의 길이에 따라 변하므로 각 지연광섬유의 길이를 적절히 조절하면 감지부에 있는 각 Mach-Zehnder 간섭계의 광경로차 ΔT 를 서로 같게 할 수 있다. 따라서 ΔT 보다 작은 폭을 갖는 광펄스 하나가 감지부를 통해 나오면 $N+1$ 개의 펄스로된 광펄스열이 만들어진다. 이 광펄스열이 광경로차가 ΔT 인 보상간섭계를 지나면 짧은 광통로를 진행한 광펄스열과 긴 광통로를 진행한 광펄스열이 ΔT 만큼의 시간차를 갖고 나온다. 그중에서 N 쌍의 광펄스는 각각 진행한 광경로의 길이가 같아져 서로 겹치게 되므로 보상간섭계에서 나오는 광펄스는 $N+2$ 개이다. 즉, N 개의 센서가 있는 감지부 및 보상간섭계로 구성된 TDM 방식 센서 어레이에 한개의 광펄스가 입사되면 간섭펄스 N 개와 그 양끝에 간섭을 하지못한 펄스 두개가 나온다. 그러므로 입력펄스의 반복주기를 $(N+1)\Delta T$ 로 맞추면 $N/(N+1)$ 의 출력 duty cycle을 얻는다. 이와 같은 최적조건에서 한 입사 광펄스에 의해 발생하는 출력펄스들 중의 마지막 펄스와 다음 입사광펄스에 의한 첫번째 출력펄스가 중첩된 펄스에는 상당히 큰 광원의 위상잡음이 포함되어 있다.

III. 실험 및 결과

TDM 방식 센서 어레이의 특성을 알아보기 위해 구성한 실험장치는 그림 4와 같다. 센서 어레이의 광원으로는 830 nm의 파장에서 단일 종모드인 Hitachi사의 HE8318G 레이저 다이오드(LD)를 사용하였다. 실험장치에 사용된 광학 부품에서 발생하는 반사로 인하여서 LD에 되반사(feedback)되어 들어가는 빛이 광원의 가간섭 거리에 영향을 주기 때문에 모든 광학 부품은 광원의 파장에 대해 반사방지를 위한 유전체 코팅을 하였고 광원과 간섭계 사이에 optical isolator를 두었다. TDM을 위한 광펄스는 음향광학변조기(acousto-optic modulator,

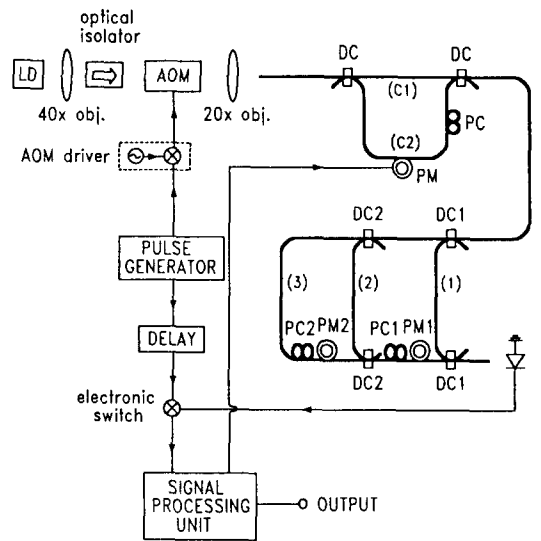


그림 4. TDM방식 광섬유 간섭계형 센서 어레이의 실험장치도. 굵은 실선: 광섬유, 가는 실선: 전선, DC: 방향성결합기, PM: 위상변조기 그리고 PC: 편광조절기.

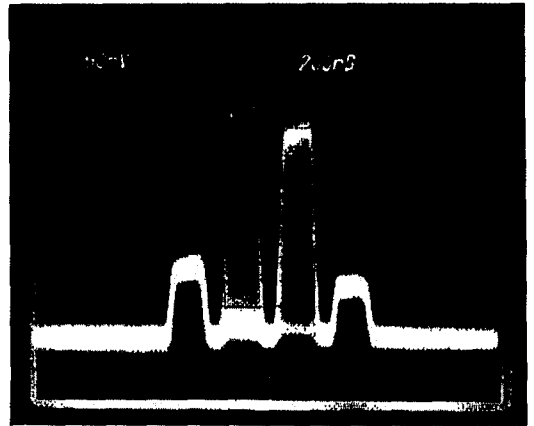
AOM)의 driver를 펄스발생기(SRS사 DG535 digital delay/pulse generator)로 구동함으로써 만들었다. 광펄스의 폭은 펄스발생기에서 나오는 전기적인 펄스의 폭을 조절함으로써 쉽게 조절할 수 있다. 광검출기로는 pre-amp.가 달려있는 PIN형 광다이오드(NEW FOCUS 1801)를 사용했다. 센서 어레이에서 나오는 신호펄스열로부터 특정 센서의 펄스를 분리해 내기 위해서 광스위치(optical switch) 또는 전자스위치(electronic switch)를 사용하였다. 스위치를 구동하는 전기적인 펄스는 입력단에서 광펄스를 만들기 위해 AOM에 가해주는 전기적인 펄스와 동기시켜야 한다. 온도와 진동 등의 주변 환경의 영향을 받아 간섭계에서 발생하는 신호소멸현상을 없애기 위해 synthetic heterodyne 신호처리방법을 사용했다.^[5]

보상간섭계에 있는 방향성 결합기 DC의 결합비율은 50%이고 감지부의 방향성 결합기 DC1과 DC2의 결합비율은 각각 33%와 50%이며, 이는 감지부에 있는 두개의 센서에서 동일한 측정감도를 얻기위한 조건을 만족시키는 방향성결합기의 결합비율이다. 입력단에 있는 보상간섭계에는 신호처리에 필요한 위상변조기 PM과 편광조절기 PC를 그리고 감지 간섭계에는 편광조절기 PC1, PC2와 시뮬레이션 신호를 가해주기 위한 위상변조기 PM1, PM2를 설치한 다음 fusion splicer와 기계적 splice를 이용해 서로 연결하여 실험에 필요한 광섬유 간

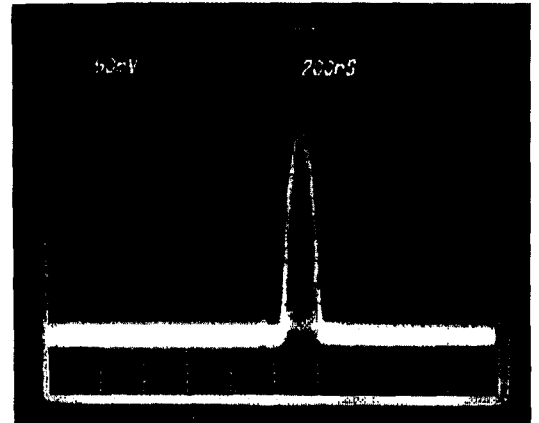
섭계를 구성하였다. Unbalanced Mach-Zehnder 간섭계인 보상간섭계와 감지간섭계의 광경로차가 같을수록 광원의 위상 잡음이 작기 때문에 되도록이면 두간섭계의 광경로차를 같도록 만들어야 한다. 30 ns의 펄스폭을 갖는 광펄스를 간섭계에 입사시킨 후 간섭계의 광경로차만큼 분리되어서 나오는 두 개의 펄스를 디지털 오실로스코프(LeCroy 9420)로 받아서 두 펄스 사이의 시간차로부터 간섭계의 광경로차를 측정하였다. 이렇게 해서 각 간섭계의 광경로차를 대략 70 m로 만들었고 간섭계간의 광경로차는 3 cm 이하로 맞출 수 있었다.

그림 5의 (a)는 폭이 160 ns이고 반복율이 600 kHz인 광펄스를 광섬유에 입사시켰을 때 나오는 TDM방식 센서 어레이의 출력이다. 본 센서 어레이에서 최대의 duty cycle을 얻기 위한 광펄스의 반복율은 대략 1.4 MHz이지만 AOM 구동을 위해 사용된 펄스발생기의 성능이 못미쳐 1.4 MHz로 구동할 수 없었다. 광펄스가 보상간섭계를 지나면서 간섭계의 광경로차만큼 분리되어 두개의 펄스로 나뉘어지고, 이 두개의 펄스는 감지부를 지나면서 각각 세개의 펄스로 나뉘어진다. 이렇게 진행된 6개의 펄스중에서 광경로의 길이가 서로 같은 두 쌍의 펄스가 겹쳐서 간섭을 한다. (a)의 왼쪽 끝에 있는 펄스가 지나온 광통로는 그림 4에서 (C1)과 (1)이고 오른쪽 끝 펄스는 (C2)와 (3)의 순으로 통과해 나온 것으로서 두 펄스 모두 광경로가 보상되지 못하기 때문에 간섭하지 못했다. 반면에 중앙에 있는 두 펄스는 간섭을 한 것이다. 왼쪽 간섭펄스는 (C1)과 (2)를 지나온 펄스가 (C2)와 (1)의 광통로를 지나온 펄스와 간섭한 것이고, 오른쪽 간섭펄스는 (C1)과 (3)으로 진행된 펄스가 (C2)와 (2)를 통해 나온 펄스와 간섭한 것이다. Synthetic heterodyne 신호처리를 위해 진폭이 상당히 큰 위상변조를 해주었기 때문에 간섭이 일어난 가운데 두펄스는 양끝의 펄스와는 달리 뿌옇게 보인다. 그림 5-b는 센서 어레이의 출력 펄스들 중에서 원하는 센서의 간섭신호만을 선택해낼 수 있음을 보여주는 사진으로 여기서는 (a)의 두번째 간섭펄스를 광섬유 출력단과 광검출기 사이에서 AOM을 사용하여 광학적으로 선택해낸 것이다. 전자스위치를 사용하여 펄스를 선택할 때에는 광검출기에서 나오는 전기적인 펄스 중에서 gating해야 하므로 스위치는 광검출기 다음에 두어야 한다.

이렇게 광학적으로 혹은 전자적으로 선택된 광펄스는 주변의 온도 및 stress 등의 변화에 따라 불규칙하게 변하는 위상 bias로 인한 신호소멸현상을 제거하고 안정된 크기의 신호를 얻기 위하여 synthetic heterodyne 신호처리장치로 보내어진다.^[5] Synthetic heterodyne 신



(a)



(b)

그림 5. (a) 센서 어레이의 출력. 두번째와 세번째 펄스가 간섭펄스. (b) 음향광학변조기를 사용해서 세번째 펄스만을 분리해낸 것.

호처리는 빛의 위상변화를 전기적인 신호의 위상변화로 바꾸어주는 것이며, 이 전기적인 신호의 위상변화를 측정하면 신호소멸현상이 없는 안정된 신호를 얻을 수 있다. 이와같이 구성된 TDM 방식 간섭계형 센서 어레이에서 측정감도에 영향을 주는 두 가지 잡음원에 대해 알아보았다. 첫번째로 광원의 세기잡음을 dc에 대한 잡음의 비(relative intensity noise, RIN)로 나타낸 결과가 그림 6이다. 광원의 출력을 광검출기로 직접 받아 RF 스펙트럼 분석기(Hewlett-Packard사 3588A)를 사용하여 측정하였다. (a)는 LD의 L-I 특성과 25 kHz에서 측정된 RIN을 함께 그린 것으로서 LD의 문턱 전류 부근에서

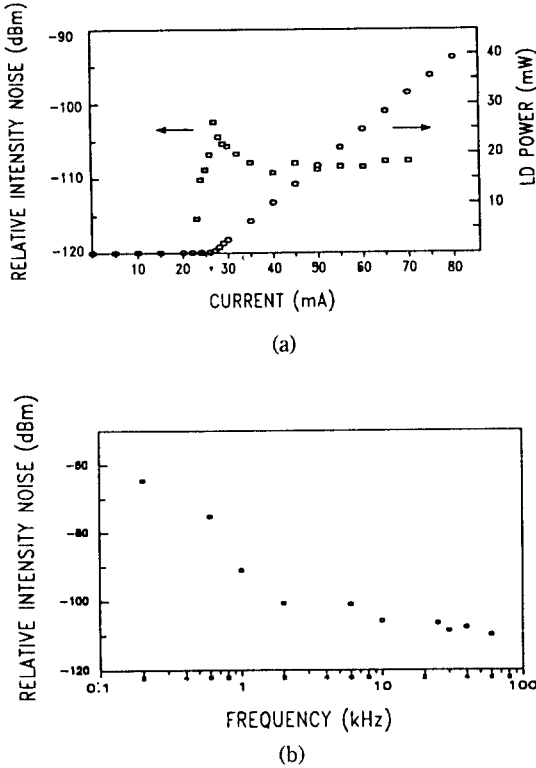


그림 6. 광원으로 사용된 LD의 상대적인 세기잡음(RIN). (a) 구동전류에 따른 RIN(□)과 LD의 출력(○), (b) 구동전류 40 mA에서 주파수에 따라 측정된 RIN

RIN이 최대이다. (b)는 40 mA의 구동전류에서 주파수에 따라 측정된 RIN이다. 25 kHz 부근에서 대략 -110 dB인데 위상잡음으로 환산하면 약 $3 \mu rad/\sqrt{Hz}$ 이다. 두 번째로 광검출기에 도달하는 광출력에 따른 광검출기의 shot noise는 위상잡음으로 환산하면 약 $0.7 \mu rad/\sqrt{Hz}$ 이다. 또한 센서가 정상적으로 작동하는 상태에서 광원만을 끄고서 센서에 사용된 광검출기 및 신호처리장치 등에 의한 전기적 잡음을 관측한 다음 그것보다 빛에 의한 잡음이 더 크도록 광출력을 충분히 크게하고서 센서의 성능을 조사하였다.

감지부에 있는 센서 중에서 보상간섭계에서 가까운 센서를 S1, 먼 센서를 S2라고 하자. 그림 7은 주파수에 따른 센서 S2의 측정감도를 나타낸 것이다. (○)는 AOM을 사용해서 광학적으로 신호펄스를 뽑아낸 경우이고 (△)는 전자스위치로 선택한 경우이다. 센서의 측정감도는 대략 1 kHz 이하에서는 주변잡음 때문에 떨어지고 수 kHz의 주파수에서는 AOM과 전자스위치를

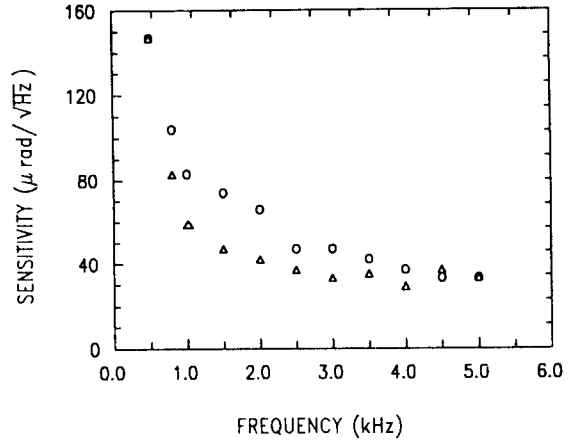


그림 7. 감지부에 있는 두번째 센서의 측정감도. □: 광학스위치로 분리, ○: 전자스위치로 분리.

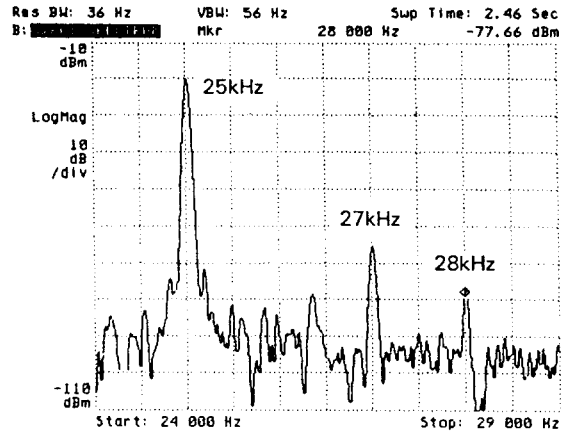


그림 8. 센서 어레이의 cross talk을 보여주는 스펙트럼. S1에 2 kHz 10 mrad과 S2에 3 kHz 2.8 rad의 신호를 각각 걸어준 상태에서 S1의 출력을 전자스위치로 분리해낸 경우의 스펙트럼이다.

사용한 경우 모두 약 $40 \mu rad/\sqrt{Hz}$ 이다. 앞에서 알아본 세기잡음과 광검출기의 shot noise보다 측정감도가 나쁜 것으로 보아서 감도를 제한하고 있는 잡음원은 광원의 위상잡음에 의한 것으로 생각된다. 광원의 위상잡음을 줄여서 더 좋은 측정감도를 얻기 위해서는 간섭계의 광경로차이를 mm 수준까지 맞추어야 한다.^[6] 본 실험에서 사용한 펄스를 이용하는 방법으로 맞출 수 있는 길이차의 한계는 cm 정도이므로 더 정교한 방법으로 측정해야 하는데 Tur 등이 개발한 filtering 기술을 사용하면 mm 정도까지 정확히 측정할 수 있다.^[7]

그림 8은 센서의 측정감도와 센서 사이의 cross talk

level을 보여주는 스펙트럼이다. 25 kHz의 peak는 synthetic heterodyne 신호처리로 인해 나타나는 carrier 신호이고 27 kHz와 28 kHz는 감지부의 위상변조기에 2 kHz 및 3 kHz로 걸어준 신호로 인하여 발생한 sideband 신호이며 그밖의 peak들은 주변의 잡음 때문에 발생한 것이다. S1에는 진폭이 10 mrad이고 주파수가 2 kHz인 신호를 그리고 S2에는 진폭이 2.8 rad이고 주파수가 3 kHz인 신호를 걸어주고서 전자스위치를 사용해 추출해 낸 S1 펄스의 RF 스펙트럼이다. 2 kHz의 peak로부터 측정감도가 약 $40 \mu rad/\sqrt{Hz}$ 임을 알 수 있고, 3 kHz의 신호를 2 kHz의 신호와 크기를 비교함으로써 얻은 cross talk은 -55 dB였다. 광학적인 방법으로 신호펄스를 분리한 경우의 cross talk은 대략 -50 dB였다. Cross talk은 입력광펄스의 폭이 클수록 그리고 신호펄스를 분리해내는 스위치의 on-off 성능이 나쁠수록 커진다.

IV. 결 론

광섬유로된 unbalanced Mach-Zehnder 형태의 보상 간섭계와 감지간섭계로 이루어진 TDM 방식 센서 어레이를 구성하였다. TDM에 필요한 광펄스는 CW 레이저 다이오드 출력을 AOM으로 gating하여 얻었다. Unbalanced 간섭계의 광경로차는 폭이 30 ns인 광펄스를 입사시킬 때 분리되어어나오는 두 펄스 사이의 시간차를 읽어 측정하였다. 각 간섭계의 광경로차는 대략 70 m이고 간섭계들의 광경로차는 서로 3 cm 이내로 같게 맞추었다. 폭이 160 ns이고 반복율이 600 kHz인 광펄스로 센서 어레이를 구동하였다. 센서 어레이의 출력광펄스 중에서 특정 센서의 펄스만을 선택하기 위해서 광스위치 또는

전자스위치를 사용하였다. 온도, 진동 등에 의해 불규칙하게 변하는 위상에 따른 신호소멸현상은 synthetic heterodyne 신호처리방법을 사용하여 해결하였다.

광원으로 사용된 LD의 세기잡음비(RIN)는 25 kHz에서 약 $3 \mu rad/\sqrt{Hz}$ 였고, 광검출기에 의한 shot noise level은 약 $0.7 \mu rad/\sqrt{Hz}$ 였다. 센서 어레이의 측정감도는 수 kHz 주파수 영역에서 약 $40 \mu rad/\sqrt{Hz}$ 인데 감도를 제한하는 잡음원은 간섭계 광경로차에 따른 광원의 위상 잡음이다. 감지부에 있는 센서 사이의 cross talk은 -50 dB 이하였다.

참고문헌

[1] A. D. Kersey, Proc. Optical Fiber Sensors, 313 (1990).
 [2] J. L. Brooks, B. Moslehi, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, IEEE J. Lightwave Technol., **LT-5**, 1014 (1987).
 [3] A. Dandridge, A. B. Tveten, A. D. Kersey, and A. M. Yurek, IEEE J. Lightwave Technol., **LT-5**, 947(1987).
 [4] B. Moslehi, IEEE J. Lightwave Technol., **LT-4**, 1704(1986).
 [5] B. Y. Kim, and H. J. Shaw, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **478**, 142(1983) and Opt. Lett., **9**, 378(1984).
 [6] A. Dandridge, and A. B. Tveten, Appl. Phys. Lett., **39**(7), 530(1981).
 [7] M. Tur, B. Y. Kim, J. L. Brooks, and H. J. Shaw, Electron. Lett., **22**, 778(1986).

Characterization of a Fiber-optic Interferometric Sensor Array

Joon Tae Ahn and Byoung Yoon Kim

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: January 24, 1994)

A fiber-optic interferometric sensor array capable of passive remote sensing is demonstrated with two sensors at the array head. The signal from a specific sensor could be separated in time domain. The measured sensitivity at signal frequencies of a few kHz and cross talk level between two sensors were about $40 \mu rad/\sqrt{Hz}$ and below -50 dB, respectively.