

간섭무늬의 변화갯수 측정을 이용한 광섬유 교류전압센서*

김봉규 · 김병윤

한국과학기술원 물리학과

김 만 식

금성전선(주) 광·통신연구소

(1994년 2월 14일 받음)

감지부에 PZT tube를 이용한 위상변조기를 연결한 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하고, 새로운 신호처리 장치를 도입하여 인가교류전압의 주파수에 상관없이 전압의 크기 및 인가전압의 파형을 측정할 수 있는 광섬유 전압센서를 구성하였다. 이 센서에서 전압변화에 따른 간섭무늬 변화갯수의 관계는 선형적 비례관계를 가짐을 관측하였으며, 온도변화에 따른 간섭무늬의 변화갯수를 측정했다. 또한, 간섭계 출력에서 편광변조에 의해 생길 수 있는 간섭무늬의 visibility의 변화를 없애기 위해 편광유지 광섬유를 이용한 간섭계 또는 광섬유 반파장판을 이용할 수 있음을 보였다.

I. 서 론

광섬유 전압센서는 위상변조기를 만들 때 사용하는 PZT tube를 이용한 것^[1,2]과 piezo-electric 폴리머 물질을 입혀서 만든 광섬유를 이용하는 것,^[3] 또는 전기장의 영향을 이용하는 방법^[4] 등의 여러가지 형태의 간섭계로 구성할 수 있다. 본 연구에서는 PZT tube를 사용하여 Mach-Zehnder 간섭계형 광섬유 전압센서를 구성하였으며, 간단한 신호처리를 도입하여 전압측정과 파형재현을 실현하였다.

대부분의 고정밀 광섬유 간섭계형 센서는 간섭무늬의 위상차 변화가 2π 보다 작을 때 그 위상의 변화를 관측함으로써 인가되는 양의 크기를 측정한다. 이런 종류의 센서들은 외부영향에 대해 매우 민감할 뿐만 아니라, 광원에서 출력되는 빛의 세기가 변하거나 간섭신호의 visibility가 바뀌게 되면 정밀측정이 어려워진다. 따라서 이러한 간섭계형 센서의 신호처리가 매우 복잡해지는 성향이 있다. 본 연구에서는 측정하고자 하는 양에 대해 위상의 변화량을 크게 설계한 뒤, 일정시간 동안 간섭무늬의 변화갯수를 세는 방법을 이용함으로써 측정감도는 낮지만 외부영향, 광원 및 간섭계에서 생길 수 있는 변화들의 영향을 거의 받지 않고, 간단한 신호처리와

광학적 구성으로써 전압을 측정하는 방법을 구현하였다.

인가전압의 주파수가 변하거나 주파수를 잘 알지 못할 때, 인가전압의 주파수에 관계없이 전압의 크기를 정확히 측정하기 위하여 인가전압의 주파수 또는 주기를 측정하여야 한다. 이 문제는 간섭무늬의 세기를 시간적으로 미분함으로써 인가전압의 주기를 구하고, 인가전압의 반주기 동안 간섭무늬의 변화갯수를 셈으로써 주파수에 상관없이 전압의 크기측정 및 파형재현을 할 수 있었다.

이와 같이 구성된 전압센서의 온도변화에 따른 측정감도의 변화를 조사하였고, 고전압을 PZT tube에 인가할 때 편광변조(polarization modulation)에 의한 영향을 편광유지 광섬유를 사용하여 꾸민 간섭계, 또는 광섬유 반파장판(half-wave-plate)을 사용하여 제거할 수 있음을 보였다.

II. 전압크기 측정 및 파형재현

그림 1과 같이 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계로 전압센서를 구성하였다. 단일모우드 광섬유를 PZT tube에 감아서 감지부(sensing arm)를 만들었다. 이 PZT tube에 교류전압 $V_0 \cdot \cos(\omega t)$ 을 가해주면 간섭계의 출력부에서 검출되는 빛의 세기는 광섬유 방향성결합기의 결합비율이 50/50이고, 간섭하는 두 빛의 편광이 같을 때 다음과

* 본 연구는 상공자원부 공업기반기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음.

같이 나타난다.^[5]

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \cos \{ad_{33}NV_0 \cos(\omega t)\}] \quad (1)$$

여기서, I_0 는 출력되는 최대 빛의 세기, N 은 PZT tube에 감겨진 광섬유 횡수, d_{33} 는 PZT tube의 전압-팽창계수, α 는 광섬유의 재질 및 광원의 파장에 의해 결정되는 비례상수이다. 간섭무늬의 모양은 그림 2와 같이 나타나며, 인가전압의 반주기(인가전압이 최대에서 최소, 또는 최소에서 최대로 변하는 시간)동안 간섭무늬의 변화갯수 N_F 는

$$N_F = 2(ad_{33}NV_0)/2\pi = ad_{33}N/\pi \cdot V_0 \quad (2)$$

으로 나타나며 인가전압의 크기에 비례하므로 반주기 동안 간섭무늬의 변화갯수를 측정함으로써 전압의 크기를 측정할 수 있다.

따라서, 전압의 크기를 측정하기 위하여, 먼저 인가전압의 주기를 알아야 하며 인가전압의 주기를 측정하기 위하여, 간섭무늬의 세기를 시간에 따라 미분하여 보았다. 간섭무늬의 세기(수식 1)를 시간에 따라 미분한 값은

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I_0}{2} ad_{33}NV_0 \omega \sin(\omega t) \sin\{ad_{33}NV_0 \cos(\omega t)\} \quad (3)$$

이 된다. 만약 $ad_{33}NV_0$ 의 값이 2π 보다 크면 $ad_{33}NV_0 \omega \sin(\omega t)$ 항은 $\sin\{ad_{33}NV_0 \cos(\omega t)\}$ 의 항보다 더 천천히 변하여 미분한 값의 envelope를 형성하게 된다. 간섭무늬의 세기를 시간에 대해 미분한 값의 envelope는 다음과 같이 인가전압과 같은 주기를 갖는 삼각함수로 나타난다.

$$E = \frac{I_0}{2} ad_{33}NV_0 \omega \sin(\omega t) \quad (4)$$

간섭무늬의 세기를 시간에 따라 미분한 신호는 그림 3과 같으며, 인가전압이 최대 또는 최소값이 될 때 미분값의 envelope은 0이 된다. 즉, envelope의 값이 0이 되는점 사이의 시간은 인가전압의 반주기가 된다.

1. 전압의 크기측정

전압의 크기 측정은 간섭무늬의 세기를 시간에 따라 미분하여 인가전압의 주기를 측정하여 반주기 동안 간섭무늬의 변화갯수를 세는 방법을 이용할 수 있다. 또한, 일정시간동안 간섭무늬의 변화갯수를 측정함으로써 인가전압의 크기를 측정할 수 있는데 이 때에 간섭무늬의 변화갯수는 전압의 크기 뿐만 아니라 주파수의 크기에도

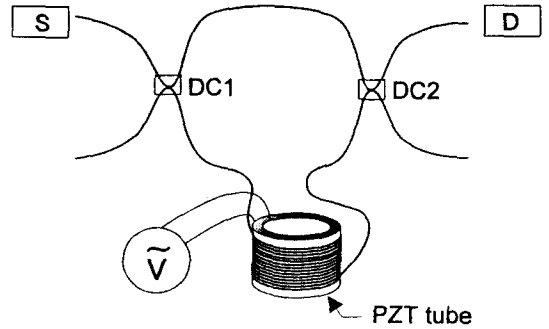


그림 1. 실험장치도(S: 광원, D: 광검출기, DC: 방향성 결합기, V: 교류전압 발생기).

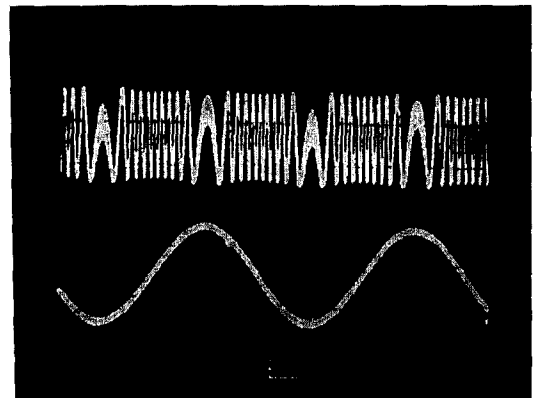


그림 2. 광검출기에서의 간섭무늬 출력신호.(윗줄: 간섭무늬, 아랫줄: 인가전압).

비례하게 된다. 따라서, 인가전압의 주파수를 알고 있고 주파수의 변화가 없을 때에는 간단한 신호처리장치(주파수 측정기: frequency counter)를 이용하여 일정시간 동안 간섭무늬의 변화갯수를 세어 전압의 크기를 측정할 수 있고, 인가전압의 주파수를 알지 못하거나 주파수가 변할 때에는 간섭무늬의 세기를 시간에 대하여 미분하는 것을 이용하여 반주기동안 간섭무늬의 변화갯수를 세어 전압의 크기를 알 수 있다.

먼저, 가장 간단한 신호처리 장치인 주파수 측정기를 이용하여 일정시간(1초)동안 간섭무늬의 변화갯수를 세어 전압의 크기를 측정하였다. 파장이 633 nm인 He-Ne 레이저, 결합비율이 50/50인 방향성 결합기(directional coupler), 그리고 금전선사의 단일모우드 광섬유를 사용하여 간섭계를 구성하였다. 간섭계의 감지부에는 광섬유를 40바퀴를 감은 PZT tube(Vernitron 사의 PZT-5 H)를 연결하였다. 이 PZT tube에 주파수가 60 Hz인 교류전압을 0에서 500 V_{rms} 까지 인가하면서 주파수 측정

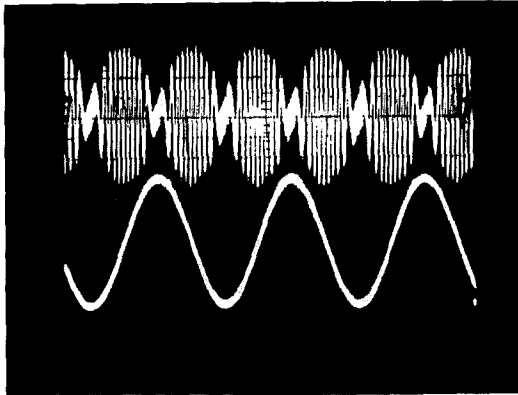


그림 3. 간섭무늬의 세기를 시간에 따라 미분한 신호. (윗줄: 미분신호, 아랫줄: 인가전압).

기로 간섭무늬 변화갯수를 측정하였다. 그 결과는 그림 4와 같이 나타났으며, 측정감도(sensitivity)는 0.051 fringes/(V_{rms} ·turn·Hz)로 나타났으며, 전압변화에 따라 선형적 비례관계를 가졌다. 또한, 전압센서의 안정도(stability)는 3% 이내였다.

다른 방법으로 인가전압의 반주기 동안의 간섭무늬의 변화갯수를 세는 방법이 있다. 이 방법으로 인가전압의 주파수를 모르거나 주파수가 변하더라도 주파수에 관계 없이 전압의 크기를 측정할 수 있다. 인가전압의 주기는 간섭무늬의 세기를 시간에 따라 미분한 값의 envelope이 0이 되는 점으로부터 측정되어 진다. 그림 5의 전압측정 신호처리의 개략도에서 envelope의 값이 0이 될 때 즉 인가전압이 최대 또는 최소인 경우에 reset 신호가 발생되게하여 counter를 조절함으로써 인가전압의 반주기 동안 간섭무늬의 변화갯수를 셀 수 있다. 830 nm의 파장에서 단일모우드인 편광유지 광섬유를 사용하여 Mach-Zehnder 간섭계를 구성한 후 전압변화에 따른 간섭무늬의 변화갯수를 관측하여 보았다. 기준부(reference arm)와 감지부(sensing arm)의 광섬유 길이는 각각 13 m이며 그 길이 차이가 1 cm 이내가 되도록 하였고, 광원으로는 파장이 830 nm인 단일모우드 레이저 다이오드를 사용하였다. 서로 다른 두 가지의 PZT tube를 사용하여 감지부를 구성한 각각의 경우에 대하여 전압과 반주기 동안의 간섭무늬 변화갯수의 관계를 측정된 결과는 그림 6과 같다. ■는 직경이 5.08 cm, 높이가 3.81 cm, 두께는 0.51 cm, 그리고 전압-팽창계수 d_{33} 의 값이 593×10^{-12} m/Volt인 PZT-5H(Vernitron사) 위에 광섬유를 77.5바퀴 감고, 주파수가 60 Hz인 교류전압을 0에서 500 V_{rms} 까지 가해주면서 반주기 동안 간섭무늬 변화갯수를 측정된 결과이다. 측정감도는 $0.023 \text{ fringes} / (V_{rms} \cdot$

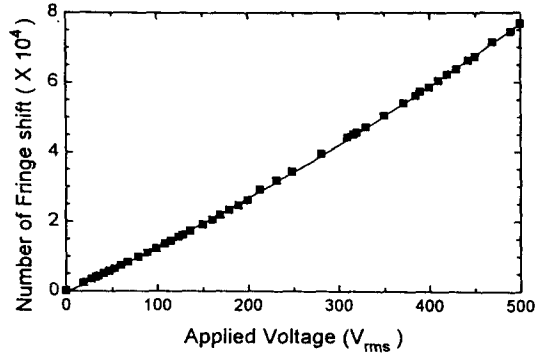


그림 4. Frequency Counter로 측정된 1초 동안의 간섭무늬 변화갯수와 전압의 관계.(PZT-5H 40바퀴 : $N_f = 38.4 + 122.9 V + 0.065 V^2$).

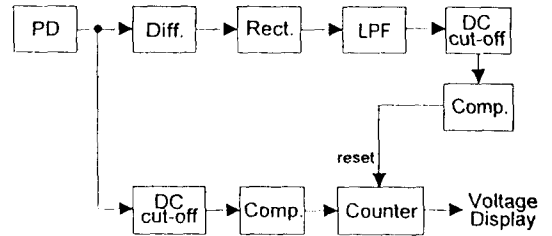


그림 5. 전압의 크기 측정 개략도.(Diff.: 미분회로, Rect.: 절대값 검출기 회로, LPF: Low pass filter, Comp.: comparator)

turn)이며 좋은 선형성을 가졌다. 한편, ▲는 직경이 3.81 cm, 높이가 3.81 cm, 두께는 0.254 cm, 그리고 전압-팽창계수 d_{33} 의 값이 295×10^{-12} m/Volt인 EC-64(EDO사) 위에 광섬유를 104.5 바퀴를 감고, 0에서 500 V_{rms} 까지 교류전압을 가해주면서 반주기 사이동안 간섭무늬 변화갯수를 측정된 결과이다. 측정감도는 $0.012 \text{ fringes} / (V_{rms} \cdot \text{turn})$ 이며, 선형적 비례관계를 가졌다.

PZT-5H의 결과로부터 주파수 측정기를 이용한 것과 반주기동안 간섭무늬의 변화갯수를 세는 방법에 대하여 같은 PZT tube인 경우 전압과 간섭무늬의 변화갯수의 관계는 거의 동일한 형태를 가짐을 알 수 있었다. EC-64의 측정감도는 PZT-5H의 반정도이며, 선형성은 PZT-5H 보다 5배 가량 더 좋았다. 전압에 대한 위상변화량을 외부영향에 의해 변하는 위상변화량보다 상대적으로 크게 만들었기 때문에 음파나 진동 등의 외부 잡음의 영향을 거의 받지 않으며, 반주기동안의 간섭무늬 변화갯수의 측정오차는 전압의 크기에 관계없이 ± 1 fringe의 오차를 가졌다.

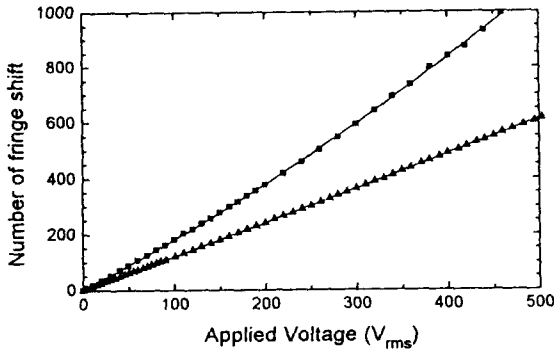


그림 6. Fringe counting을 이용하여 측정된 반주기동안의 간섭무늬의 변화갯수와 전압의 관계(830 nm에서 편광유지 광섬유 사용).
 ■: PZT-5H (Vernitron사 제품), 77.5 바퀴, $N_f = -0.685 + 1.807 V + 2.096 \times 10^{-4} V^2$, ▲: EC-64 (EDO사 제품), 100 바퀴, $N_f = -0.106 + 1.228 V + 3.305 \times 10^{-5} V^2$.

2. 인가전압의 파형재현

간섭무늬의 세기를 미분하는 방법과, 인가전압의 주파수를 측정하여 반주기동안 간섭무늬의 변화갯수를 셈하는 방법의 두가지 방법을 이용하여 인가전압의 파형을 관측할 수 있다.

간섭무늬의 세기에 대해 미분한 신호의 envelope와 인가전압 사이의 위상은 그림 3과 같이 $\pm \pi/2$ 의 차이를 갖고, 모양은 일치한다. 따라서 간섭무늬를 시간에 따라 미분한 신호의 envelope 모양을 관측함으로써 인가전압의 파형변화를 관측할 수 있다.

또 다른 방법으로, 간섭무늬의 세기를 시간적으로 미분하여 얻은 주기와 간섭무늬 세기의 변화갯수를 셈으로써 인가전압의 파형을 재현할 수 있다. 인가전압의 주기는 그림 5에서의 신호처리 장치로 구할 수 있으며, 그림 7의 (a)와 같은 개략도를 통해 인가전압의 반주기(인가 전압이 최소인 점에서 최대가 되는점 사이의 시간) 동안은 간섭무늬의 변화갯수를 셈하여 더하고, 다음 반주기(인가 전압이 최대가 되는 점과 최소가 되는 점 사이의 시간)동안은 간섭무늬의 변화갯수를 셈하여 빼는 과정을 반복함으로써 인가전압의 파형을 재현할 수 있다. Fringe counting을 이용하여 재현된 파형신호는 그림 7의 (b)와 같이 나타났다. 이때 인가전압이 최대인지 최소인지를 측정하지 못하기 때문에, 재현된 신호는 인가전압의 파형이 일치할 때도 있고, 인가전압과 π 의 위상차를 갖는 파형을 출력할 때도 있다.

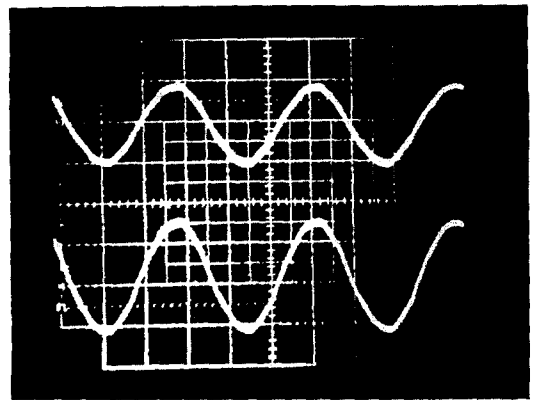
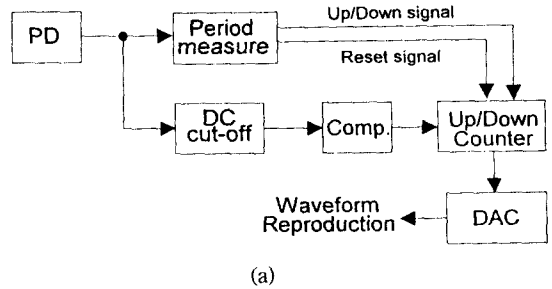


그림 7. Fringe counting을 이용한 파형재현.
 (a) 파형재현 개략도(Comp.: comparator, DAC: digital to analogue convertor) (b) 파형재현된 신호.(윗줄: 재현신호, 아랫줄: 인가전압).

III. 온도에 대한 특성조사

온도가 변하면 PZT tube의 전압-팽창계수(d_{33}) 값이 변할 뿐만 아니라, 광섬유의 굴절율과 길이변화, stress 등에 의해 전압변화에 따른 간섭무늬의 변화갯수의 관계가 변하게 된다. 온도가 변화함에 따라 PZT tube의 종류, 광섬유의 종류에 따라 측정감도(단위전압당 반주기동안의 간섭무늬의 변화갯수)가 변하게 된다. 온도변화에 따른 측정감도의 변화를 관측하기 위하여 광원과 광검출기를 제외한 광섬유 간섭계를 냉장고 및 오븐에 넣고 실험하였다. 이때 상온 이상에서는 오븐을 이용하여 20 C 에서 80C 까지, 상온이하에서는 냉장고를 이용하여 -20C 에서 20C 까지 온도를 조절하였으며, 온도는 AD 534를 이용한 thermocouple을 사용하여 측정하였다. Function Generator를 사용하여 주파수 60 Hz, 크기 40 V_{p-p} 의 교류전압을 PZT tube에 인가하였다. 간섭무늬의 변

화갯수를 세는 신호처리장치는 1 fringe 단위로 측정하기 때문에 간섭무늬의 변화갯수가 작을 때에는 온도특성을 세밀히 관측할 수 없다. 따라서, 온도특성을 좀더 세밀히 관측하기 위하여 Storage Oscilloscope를 사용하여 1/20 fringe 단위로 간섭무늬의 변화갯수를 측정하였다.

1. PZT-5H의 온도특성

직경이 5.08 cm, 높이가 3.81 cm, 두께는 0.51 cm, 그리고 전압-편광계수 d_{33} 의 값이 593×10^{-12} m/Volt인 PZT tube(Vernitron사의 PZT-5H) 위에 단일모우드 편광유지 광섬유를 77.5 바퀴를 감고, 파장이 830 nm인 단일모우드 레이저 다이오우드를 사용하여 간섭계를 구성하였다. 이 간섭계 온도특성은 그림 8의 ■과 같이 나타났다. 온도가 1°C 씩 증가함에 따라 측정감도는 약 0.35%씩 선형적으로 증가하였다. 이 값은 전체 온도변화 100°C 가 될 때 약 35%가 변하는 것으로 온도가 변화함에 따라 측정감도가 매우 많이 변화됨을 관측하였다.

2. EC-64의 온도특성

직경이 3.81 cm, 높이가 3.81 cm, 두께는 0.254 cm, 그리고 전압-편광계수 d_{33} 의 값이 295×10^{-12} m/Volt인 PZT tube(EDO사의 EC-64) 위에 세가지 종류의 광섬유를 감은 전압센서에 대해 각각의 온도특성을 조사하였다. 먼저, 금성전선사의 단일모우드 편광유지 광섬유를 PZT tube 위에 104.5바퀴를 감고, 파장이 830 nm인 단일모우드 레이저 다이오우드를 사용하여 전압센서를 구성하였다. 온도가 변화함에 따른 측정감도의 변화는 그림 8의 ▲과 같이 나타났다. 상온이하에서 온도가 증가할수록 측정감도가 선형적으로 일정하게 감소하며, 상온이상에서는 온도변화에 관계없이 측정감도의 변화가 거의 없음을 관측하였다.

다음으로, 633 nm에서 단일모우드인 금성전선사의 광섬유를 PZT tube 위에 70바퀴 감고, 파장이 633 nm인 He-Ne 레이저를 광원으로 사용한 전압센서를 구성하였다. 이 전압센서의 온도특성은 그림 8의 ●과 같이 나타났으며, 830 nm에서 편광유지 광섬유와 비슷하게 상온이하에서 온도가 증가할수록 측정감도가 선형적으로 일정하게 감소하며, 상온이상에서는 온도변화에 관계없이 측정감도의 변화가 거의 없음을 관측하였다. 그러나, 상온에서 측정감도가 불연속적인 특성을 나타내었다. 이는 센서를 오븐에서 냉각고로 이동하면서 발생하는데, 그 원인은 명확히 알려져 있지 않다.

한편, Ensign-Bickford사의 830 nm 단일모우드 광섬유를 PZT tube 위에 100 바퀴 감고, 파장이 830 nm인

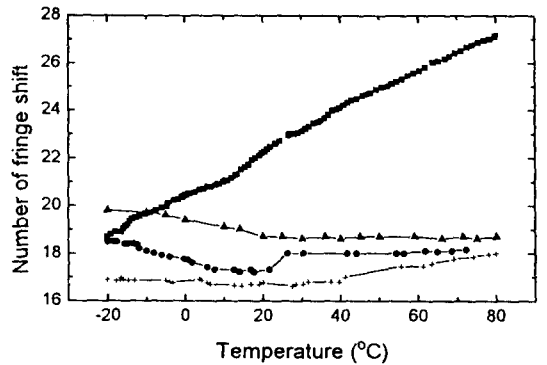


그림 8. 온도변화에 따른 특성변화.

- : PZT-5H, 830 nm 편광유지 광섬유, 70 바퀴,
- ▲: EC-64, 830 nm 편광유지 광섬유, 104.5 바퀴,
- : EC-64, 633 nm 단일모우드 광섬유, 70 바퀴,
- + : EC-64, 830 nm 단일모우드 광섬유, 100 바퀴.

단일모우드 레이저 다이오우드를 사용하여 만든 전압센서의 온도특성은 그림 8의 +와 같이 나타났다. 앞의 경우와 달리 상온이하에서는 온도변화에 관계없이 측정감도의 변화가 없으며, 상온이상에서 온도가 증가할수록 측정감도는 일정한 비율로 증가하였다.

EC-64의 PZT tube 위에 830 nm 단일모우드 광섬유, 830 nm 편광유지 광섬유, 및 633 단일모우드 광섬유를 감았을 때 -20°C 에서 80°C 사이의 온도변화에서 측정감도의 변화는 7% 이내이며, 각 광섬유마다 서로 다른 특성곡선을 나타내었다.

3. 광섬유에 페트로롤럼 젤리를 바른후 EC-64의 온도 특성

온도가 변할 때 광섬유의 굴절율 및 기타 요인에 의한 측정감도의 변화는 PZT tube의 전압편광계수의 변화보다 매우 작다. 따라서, 일반적으로 PZT를 이용한 전압센서의 경우 온도특성은 PZT tube의 온도특성과 거의 일치한다. 위의 실험에서 같은 PZT tube에서 각기 다른 광섬유에 대해 특성이 다르게 나타난 것이 주위의 영향에 의한 것인지 확인하기 위해서 EC-64의 PZT tube 위에 감겨진 광섬유 표면에 페트로롤럼 젤리(vaseline)를 바른 후 온도에 대한 특성을 조사하였다. 그 결과는 그림 9와 같이 광섬유의 종류에 상관없이 온도특성이 거의 비슷하게 나타났다. 상온이하에서의 측정감도는 온도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하고 상온이상에서는 온도변화에 관계없이 측정감도의 변화가 거의 없으며, -20°C 에서 80°C 사이의 온도변화에서 측정감도의 변

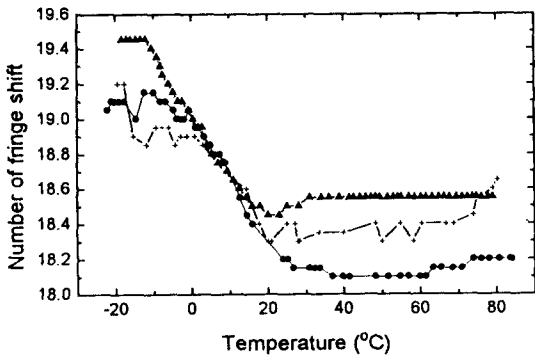


그림 9. 습기의 효과를 제거하기 위해 PZT tube에 감겨진 광섬유 위에 페트로륨 젤리를 바른 후 온도변화에 따른 특성변화.

▲: EC-64, 830 nm 편광유지 광섬유, 104.5 바퀴,
●: EC-64, 633 nm 단일모우드 광섬유, 70 바퀴,
+: EC-64, 830 nm 단일모우드 광섬유, 100 바퀴.

화는 약 5% 이내였다.

이상의 결과에서 대기중에 존재하는 습기 및 다른 요인에 의해 광섬유 자켓의 종류에 따라 온도특성이 다르게 나타나며, 광섬유 표면에 페트로륨 젤리를 발랐을 때에는 광섬유의 종류에 관계없이 특성이 비슷함을 알 수 있었다.

IV. 편광변조(Polarization Modulation)

선형 복굴절이 있는 광섬유를 빛이 진행할 때, 두개의 수직인 편광모우드는 서로 다른 전파상수를 갖고 진행한다. 광섬유 처음 부분에 임의의 편광축으로 빛이 입사되면, 광섬유 끝부분에서 빠져나오는 빛의 편광축은 광섬유의 길이, 굴절을 및 선형복굴절의 크기에 의해 결정된다. 즉, 광섬유의 길이, 굴절을 및 복굴절의 크기가 변하면 출력되는 빛의 편광이 변한다. 만약, 광섬유 간섭계를 꾸민 후, 한쪽 팔(arm)의 광섬유를 변화시키면 편광이 변하고, 이에 따라 간섭계에서 출력되는 간섭무늬의 visibility가 변하게 된다.

광섬유를 PZT tube에 둥글게 감으면 bending stress에 의해 선형복굴절이 생긴다. PZT tube에 전압을 가하면 PZT tube에 감겨진 광섬유의 길이 및 복굴절의 크기가 변하여, 출력되는 간섭무늬의 visibility는 전압의 크기에 따라 변한다. 위상변화에 따른 편광변화는 매우 작지만, 고전압을 가하여 위상변화를 크게하면 그림 11의 (a)와 같이 편광변화가 심하여 간섭무늬의 visibility가 0이 되는

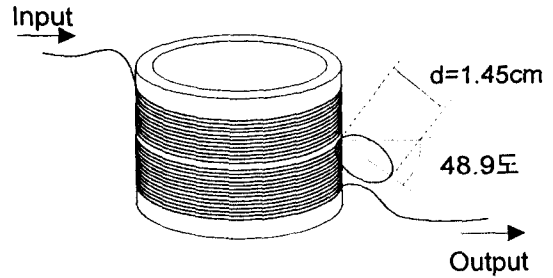
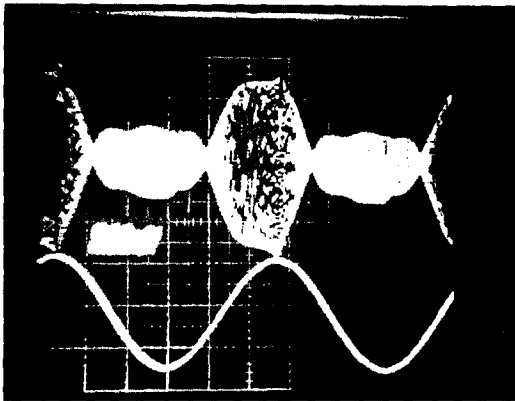


그림 10. 편광변조의 영향을 제거하기 위한 광섬유 반파장판의 설치도.

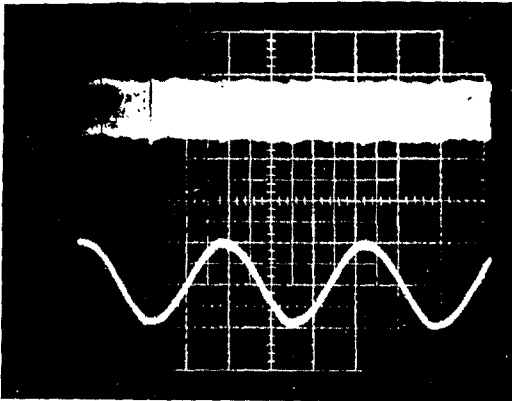
경우가 생긴다. 간섭무늬의 변화갯수를 세는 신호처리 장치는 간섭무늬의 visibility에 영향을 거의 받지 않지만, 간섭무늬의 visibility가 0이 되면 간섭신호를 얻지 못하므로 전압의 크기를 측정할 수 없다. 따라서, PZT tube에 의한 편광변조의 영향을 줄여 간섭무늬의 visibility가 0이 되지 않게 하여야 한다. 본 실험에서는 두가지 방법으로 편광변조를 줄여보았다.

첫번째 방법은 편광유지 광섬유를 사용하여 만든 간섭계를 이용하는 방법이다. 이 간섭계의 입력부에 편광기를 편광유지 광섬유의 편광축과 일치시켜서 빛의 한 편광성분만 입사 시킨다. 따라서, 이 빛은 복굴절 및 기타요인이 변하더라도 출력되는 편광축은 항상 일정하므로 간섭무늬의 visibility는 변하지 않는다. 그림 11의 (b)는 인가전압을 500 V_{rms}를 인가했을 때의 출력되는 간섭무늬의 모양이며, 편광유지 광섬유를 이용하여 편광변조의 영향을 제거할 수 있었다.

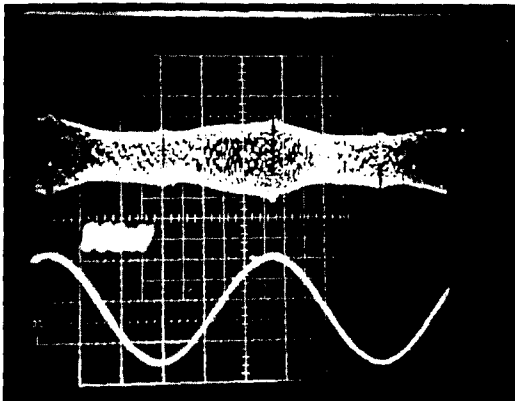
편광변조를 없애는 다른 방법은 광섬유 반파장판(half-wave-plate)을 사용하여 복굴절에 의해 생기는 위상지연을 나중에 보상하는 방법이다. 복굴절이 있는 광섬유의 중간에 반파장판을 복굴절축과 45° 되게 연결하면, 반파장판 앞의 광섬유에서 진행한 빛의 단축 성분은 반파장판 뒤의 광섬유에서는 장축으로 진행한다. 반대로 반파장판 앞의 광섬유 장축 성분의 빛은 반파장판 뒤의 광섬유 단축으로 진행하게 된다. 이때 복굴절이 생기는 부분(PZT tube에 감겨진 광섬유)의 중앙, 즉, 반파장판 앞에 감겨진 광섬유 길이와 반파장판 뒤에 감겨진 광섬유의 길이가 일치하면, 수직된 두 편광 빛의 위상차는 0이 된다. 따라서, 선형복굴절이 변하여도 출력되는 두 편광 빛의 위상차는 0이 되므로 출력되는 간섭무늬의 모양은 선형복굴절의 크기변화에 대해 영향을 받지 않는다. 클래딩의 크기가 120 μm이고, 830 nm의 파장에서 단일모우드인 광섬유(Ensign Bickford사 제품)를 그림 10과 같이 직경 1.7cm의 원형으로 한바퀴를 감아서 광



(a)



(b)



(c)

그림 11. 편광변조(인가전압: $500 V_{rms}$, 윗줄: 간섭무늬의 모양, 아랫줄: 인가전압). (a) 편광변조에 의한 간섭무늬의 visibility의 변화, (b) 편광유지 광섬유를 이용하여 편광변조를 제거한 신호, (c) 광섬유 반파장판을 이용하여 편광변조를 제거한 신호

섬유 반파장판을 만들 수 있다.^[6] 광섬유를 PZT tube 위에 50 바퀴 감고 광섬유 반파장판을 만들고 광섬유를 PZT tube에 50 바퀴를 다시 감았다. 편광변조의 영향을 가장 작게 받게 하기 위하여 광섬유 반파장판을 PZT tube의 축과 48.9° (광섬유의 비틀림에 의해 빛의 편광축이 변하기 때문에 45° 보다 큼^[7])로 설치하고 출력되는 간섭무늬의 모양을 관측하였다. 그림 11의 (c)는 광섬유 반파장판을 연결한 후 $500 V_{rms}$ 의 전압이 인가되었을 때 나타나는 간섭무늬 모양이다. 편광유지 광섬유를 사용한 간섭계를 꾸민 것과 마찬가지로 편광변조의 영향을 상당히 많이 줄일 수 있었다.

V. 결 론

PZT를 감지부(sensing arm)에 연결하여 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계형 전압센서를 구성하였다. 신호처리장치에는 Fringe counting 방법과 간섭무늬의 세기를 미분하는 방법을 고안하여, 외부영향을 거의 받지 않으면서 간단한 신호처리장치와 간단한 광학적 구성으로 전압센서를 만들었다. 이 장치로서 인가전압의 주파수에 상관없이 전압의 크기 및 파형을 측정할 수 있었다. 이 센서의 전압특성은 인가전압의 크기변화에 대한 간섭무늬의 변화계수는 좋은 선형성을 갖고 변하며, 측정오차는 전압의 크기에 관계없이 약 ± 1 Fringe 이다.

온도에 대한 특성실험에서 PZT-5H(Vernitron사 제품)을 사용하였을 경우 오차는 약 35%(온도가 -20 도에서 80 도까지 변할 때)를 갖는다. EC-64(EDO Corp.)를 사용한 경우 오차는 7%(-20 도에서 80 도까지 온도가 변할 때) 이내이며, 주위의 영향에 의해 광섬유의 종류에 따라 다른 특성곡선을 가지고 있다. 페트로롭 젤리를 광섬유 표면에 바른 전압센서의 경우 온도가 -20 도에서 80 도까지 변할 때 측정감도의 변화는 5% 이내였으며, 광섬유의 종류에 관계없이 특성곡선은 모두 같은 경향을 나타내었다.

편광변조의 문제는 편광유지 광섬유를 이용한 간섭계를 사용하여, 또는 복굴절의 변화가 있는 광섬유의 중간에 광섬유 반파장판을 연결하여 간섭무늬의 visibility의 변화를 줄임으로써 그 문제를 해결할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] K. Bohnert, G. C. de Wit, and J. Nehring, "Interferometric Dual-Mode Fiber Voltage Sensor with Remote Coherence-Tuned Interrogation", 9th Conference of OFS, 443(1993).

- [2] Y. N. Ning, B. C. B. Chu, and D. A. Jackson, "Interrogation of a Conventional Current Transformer by a Fiber-Optic Interferometer", *Opt. Lett.*, **16**, 1448(1991).
- [3] Kee, P. Koo and G. H. Sigel, "An Electric Field Sensor Utilizing a Piezoelectric Polyvinylidene Fluoride(PVDF) Film in a Single-Mode Fiber Interferometer", *IEEE J. of Quantum Electron.*, **QE-18**, 670(1982).
- [4] W. Gopel, J. Hesse, and J. N. Zemel, *Sensors*, vol. 6 (Optical Sensors) (VCH, Weinheim, 1989), p. 365-370.
- [5] Raman P. De Paula, and Emery L. Moore, "Review of All-Fiber Phase and Polarization Modulators" *SPIE.*, **478**, 3(1984).
- [6] H. C. Lefevre, "Single-Mode Fibre Fractional Wave Devices and Polarisation controllers", *Electron Lett.* **16**, 778(1980).
- [7] R. Ulrich, and Simon, "Polarization Optics of Twisted Single-Mode Fibers", *Appl. Opt.*, **18**, 2241(1979).

Fiber Optic AC Voltage Sensor Using Fringe Counting

Bong Kyu Kim and Byoung-Yoon Kim

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

Man Sik Kim

Fiber Optics and Telecom Research Lab., Goldstar Cable Co., Anyang, Kyungki, 430-080, Korea

(Received: February 14, 1994)

A fiber optic voltage sensor is demonstrated with a new signal processing scheme that displays the magnitude and the waveform of applied voltage with immunity from the signal frequency change. The sensor is based on a Mach-Zehnder interferometer with a PZT phase modulator as a sensing element. We observed a linear relationship between applied voltage and the number of fringe shift during a half cycle of the ac signal. The temperature dependence of the sensor output is experimentally evaluated over the temperature range from -20°C to 80°C . It is demonstrated that the detrimental polarization modulation effect can be overcome by using polarization maintaining fibers or a half-wave plate.