

논문 95-4-2-04

광섬유 마이켈슨 간섭계형 교류 전류센서

김창원*, 박동수**, 김명규**, 이정희**, 강신원*, 손병기**

Fiber-Optic Michelson Interferometric AC Current Sensor

Chang-Won Kim*, Dong-Su Park**, Myung-Gyoo Kim**, Jung-Hee Lee**,
Shin-Won Kang*, and Byung-Ki Sohn**

요 약

인가 전압에 의해 수축·팽창하는 원통형 PZT tube와 단일모드 광섬유를 이용하여 마이켈슨 간섭계형 교류 전류센서를 제작하였다. 본 연구에 사용된 신호처리장치는 측정전류의 주파수에 무관하게 전류의 크기를 측정할 수 있었다. 전류의 크기는 교류 전류의 반 주기 내에 생기는 간섭무늬의 개수로 측정하였다. 간섭무늬의 개수는 전류의 크기에 따라 선형적으로 변화하였으며, 온도변화(-20 °C ~ 80 °C)에 따른 오차는 5% 이내였다.

Abstract

A Michelson interferometric AC current sensor has been fabricated by using a single mode optical fiber and a cylindrical PZT tube of which a radial dimension varies with applied voltage. The signal processing scheme used in this work, measures the magnitude of AC current regardless of the frequency of the current. An AC current is measured by counting the number of interference fringe during half cycle of the AC current. The number of interference fringes varies linearly with the magnitude of the current and the error range is within 5% at the temperature range from -20 °C to 80 °C.

I. 서 론

광섬유를 이용한 센서는 소형이면서 손쉽게 구성할 수 있으므로 그 응용범위가 확대되어 산업전반에서 사용되고 있다. 특히 전력산업 분야에서는, 고압선상에 흐르는 전류를 측정하기 위하여 대부분 전기적 방식의 센서인 CT(current transformer)가 사용되고 있으나, 전기적 안정성 및 전자장에 의해 영향을 받지 않는

광섬유를 이용한 측정방법의 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1][2]}. 종래의 전류 전압센서는 광의 편광방향이 자기장에 의해 변화하는 파라데이 효과(Faraday effects)나 전기장에 의해 변화하는 포켈효과(Pockels effects)를 이용한 방법이 주류를 이루고 있으나^[3-5], 광간섭을 이용한 센서의 연구도 활발히 이루어지고 있다.^[6]

간섭계형 센서는 간섭계의 형태에 따라 Michelson, Sagnac, Mach-Zehnder, Fabry-Perot 간섭계등으로 구분하며, 이와 같은 센서는 광의 간섭현상을 이용하고 사용 파장의 10⁻⁶정도의 미소한 길이 변화까지 검출해 낼 수 있는 고감도 특성 및 광손실에 의해 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 마이켈슨 간섭계는 하나의 기준 광섬유와 서로 다른 물리량을 측정하기 위한 여러 개의 감지 광섬유를 가질 수 있어, 다측정용 간섭형 센서로서 응용가능하다.^[6-8]

* 경북대학교 센서기술연구소
(Sensor Technology Research center,
Kyungpook National University.)

** 경북대학교 전자공학과
(Department of Electronics, Kyungpook
National University.)

<접수일자 : 1995년 4월 1일>

간섭계형 센서의 신호처리는 대개 측정량에 의한 위상차변화를 2π 이내로 제한하고 간섭신호의 크기 또는 위상차의 변화를 관측함으로써 인가되는 물리량의 크기를 측정하는 것이다. 이런 종류의 센서들은 외부영향에 대해 매우 민감할 뿐만 아니라 출력광의 세기 및 간섭무늬의 선명도(visibility)가 바뀌게 되면 정밀측정이 어렵고, 신호처리가 복잡하다.

본 연구에서는 위상변화량을 크게 설계한 뒤, 일정 시간 동안 간섭무늬의 변화개수를 세는 방법을 이용함으로써 측정감도는 낮지만 외부영향, 광원 및 간섭계에서 생길 수 있는 영향은 거의 받지 않고, 간단한 신호처리와 광학적 구성으로써 고전류를 측정하는 방법을 구현하였다.^{[9][10]}

본 연구는 송전선에 흐르는 고전류를 암페어 법칙(Ampere's law)에 근거한 전기적인 전류변환기(clamp)를 사용하여 고전류를 낮은 유도전압으로 변환하여 측정하였다. 이 교류 유도전압은 간섭계의 감지 광섬유가 감겨진 PZT(piezoelectric transducer tube)에 인가되며 간단한 신호처리과정을 거쳐 교류전류의 반 주기 동안 간섭무늬의 변화개수를 헤아림으로써 주파수에 무관하게 교류 전류의 크기를 측정하였으며, 또한 전류센서의 온도에 대한 출력특성을 조사하였다.

II. 측정원리

간섭계형 광섬유 센서는 다양한 종류의 피측정량에 의한 광섬유의 굴절율 및 물리적 길이 변화를 광섬유를 통해 전송되는 광신호의 광위상 변화로 측정한다. 본 연구의 전류센서는 광섬유 마이켈슨 간섭계 및 광섬유의 스트레인(strain) 광학효과를 이용하였다. 광섬유 마이켈슨 간섭계는 간섭계의 두 광섬유단면에 있는 기준거울과 변위거울에서 반사된 두 광사이의 광경로차가 광원의 가간섭성 길이(coherence length)보다 작을 경우 간섭을 이루게된다. 두 거울의 반사율이 서로 같고 50/50 방향성 결합기를 사용하였을 때, 광출력 I 는 식(1)과 같이된다.

$$I = I_0 \{1 + \cos(\Delta\Phi)\} \quad (1)$$

여기서, I_0 는 출력광의 최대세기이며, 간섭계의 위상변화 $\Delta\Phi$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi n \Delta L}{\lambda} \quad (2)$$

여기서, ΔL 은 두 광의 경로차, λ 는 광원의 파장이며, n 은 광섬유 코어의 굴절율이다.

마이켈슨 간섭계형 센서는 위상변화($\Delta\Phi$)의 인자인 코어의 굴절율(n), 광경로(L) 및 광원의 주파수(ν)의 변화를 이용하여 물리적 변화(온도, 굴절율, 외력 등)를 감지한다.

전류센서는 이러한 인자 중 광경로를 변화시켜 진행광의 위상을 변화시키며, PZT tube를 사용하여 간섭계의 감지 광섬유에 스트레인(ΔL)과 스트레인 광학효과(Δn)를 유발시켜 위상변화를 일으킨다. 광섬유를 N회감은 내벽과 외벽이 금속으로 코팅된 원통형 PZT에 교류전압을 인가하면 PZT의 수축·팽창에 의해 광섬유에 길이변화가 생기게되며, 식 (3)과 같은 위상 변화를 일으킨다. 위상 변화는 기준 광섬유를 진행하는 광과 감지 광섬유를 진행하는 광의 위상차의 변화이다.

$$\Delta\Phi = \left(\frac{4\pi n}{\lambda}\right) \left(\frac{dL}{dV}\right) \Delta V \quad (3)$$

위상변화는 인가전압의 크기(ΔV)에 비례하며 식 (3)과같이 표현된다. 교류 전류크기는 2단계의 변조과정을 거쳐 간섭계에 의해 측정된다. 먼저, 송전선에 흐르는 고전류는 첫 번째 변조기인 clamp에 의해 낮은 유도전류로 변환된다. 규소 강판을 링 모양으로 감은 코어에 2차 권선을 감고 링의 중앙에 측정하고자하는 전류선(1차에 해당: I)을 통과시키면 유도전류($i = I/n_1$)는 2차권선수(n_2)에 반비례하여 나타난다. 1차권선인 전송선로에 전류가 흐를 때 유도코일 양단에 저항(R_L)을 병렬로 연결하면 저항 값에 비례하는 교류 유도전압이 발생하게 된다.

두 번째 변조기인 PZT tube에 clamp에서 유도된 교류 유도 전압 $V_0 \cdot \cos(\omega t)$ 을 가해주면 간섭계의 출력부에서 검출되는 광의 세기는 광섬유 방향성결합기의 결합비율이 50/50이고, 간섭하는 두 빛의 편광이 같을 때 식 (4)와 같이 나타난다.

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \cos \{ad_{33}NV_0 \cos(\omega t)\}] \quad (4)$$

여기서, I_0 는 출력되는 광의 최대세기, N 은 PZT

tube에 광섬유를 감은 횟수, d_{33} 는 PZT tube의 압전 상수(piezoelectric constant), a 는 광섬유의 재질 및 광원의 파장에 의해 결정되는 비례상수이다. 따라서 인가전압의 반주기(인가전압이 최대에서 최소, 또는 최소에서 최대로 변하는 시간)동안 간섭무늬변화개수 N_F 는 식 (5)로 주어진다.

$$N_F = 2(ad_{33}NV_0)/2\pi = ad_{33}N/\pi \cdot V_0 \quad (5)$$

식 (5)에서 N_F 는 인가전압의 크기에 비례하므로 반주기 동안 간섭무늬의 변화개수를 측정함으로써 교류전류의 크기를 측정할 수 있다.^[9]

III. 실험 및 결과

1. 전류 크기 측정

(1) 광학시스템

전류센서의 실험장치도가 그림 1에 나타나 있다. 마이켈슨 간섭계는 단일모드 광섬유에 결합된 레이저 다이오드 모듈($\lambda=1.3 \mu\text{m}$)와 결합비율이 50/50인 광섬유 방향성 결합기로 이루어져 있다. 간섭계의 양 광섬유는 기준 광섬유(reference fiber)와 감지 광섬유(sensing fiber)로 나누어지며, 양 광섬유의 끝단에 반사거울(cleaved mirror)을 제작하였다. 방향성 결합기에서 양 반사 거울까지의 거리는 16 m로 제작하였다.

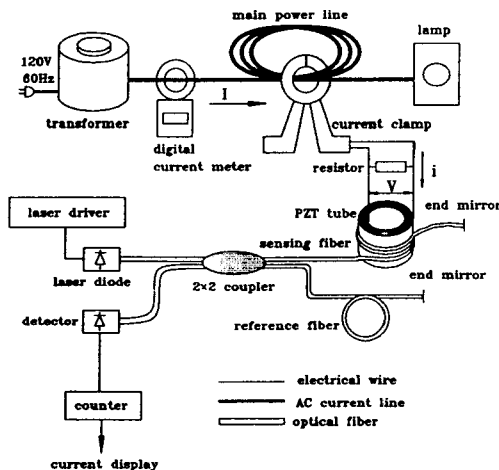


그림 1. 전류센서의 실험장치도
Fig. 1. Experimental set-up of the current sensor

광섬유 마이켈슨 간섭계의 반사거울은 cleaver(Siecor 사, 모델 FBC-005)를 사용하여 광섬유의 단면을 수직으로 잘라 만들었으며, 이 단면 반사거울에서 반사된 광은 수신장치(PINFET receiver, 모델 RTZ-565-395)에 의해 전기적인 신호로 변환되고 증폭된다.

(2) 센서헤드

전류 변조기(transducer)는 측정 전류원인 송전선에 직접 접하는 clamp와 간섭계의 광위상을 변조시키는 PZT로 나누어진다. 센서헤드의 clamp(fluke 사)는 일반적으로 널리 사용되고있는 클립온(clip-on)형이며, 전류변환율은 1000:1이고 최대 1000 A까지 사용가능하였다. Clamp에서 출력되는 유도전류를 선형성을 가진 교류유도전압으로 변환하기 위하여 고전력용 저항을 clamp의 출력단에 병렬로 연결하였다. 송전선에는 최소 0 A에서 최대 450 A의 전류를 흘렸다. 송전선의 전류원은 변압기(transformer)를 사용하여 0~120 V까지 가변하였으며, 전등(lamp)사이에서 흐르는 전류를 측정하였다. Clamp내의 단선전류는 최대 6 A가 흐르며, 68회 통과시 clamp내에 흐르는 전류는 최대 408 A까지 흐르게된다. 그림 2는 전류센서에 사용된 clamp의 출력특성을 나타낸 것으로 clamp내에 흐르는 송전선의 전류가 증가함에 따라 clamp 출력단에 유기된 교류전압이 선형적으로 증가함을 볼 수 있었다.

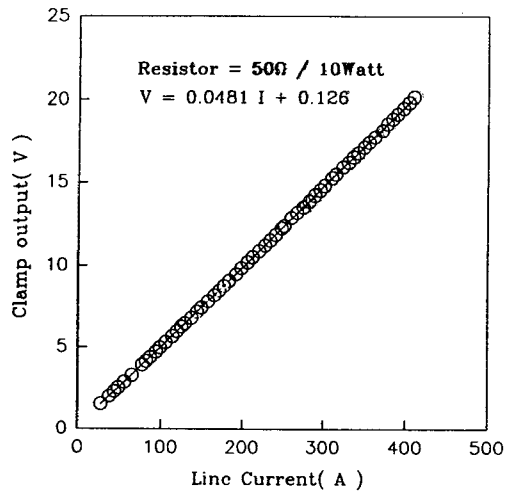


그림 2. 교류전류에 대한 clamp의 전압출력특성
Fig. 2. Voltage output characteristics of the clamp for AC current

실험에 사용된 50 Ω(10 W) 저항으로는 clamp의 유도전압을 약 20 V, 그리고 유도전류는 약 0.4 A까지 측정가능하였다. 또한 clamp의 안정도는 ±1%이내였다. 또한, PZT tube에는 간섭계의 감지부 광섬유를 58번 감아 구성하였으며, 직경이 32 mm, 높이가 22 mm, 두께가 2 mm, 그리고 압전상수가 $d_{33} = 295 \times 10^{-12}$ m/V 인 PZT tube[EC-64(EDO 사)]를 사용하였다. Clamp의 출력단에 PZT전극을 전기적으로 연결하여 두개의 변조기를 하나의 센서헤드로 제작하였다. clamp의 출력 전압은 PZT를 반경방향으로 수축·팽창시키며, 수축·팽창율(Δr)은 인가전압(ΔV)에 비례하며, $\Delta r = d_{33} \times \Delta V$ 의 관계를 가진다. 송전선에 흐르는 0~400 A의 전류를 clamp로 0~20 V의 교류유도전압으로 변환하며, 교류 유도 전압을 간섭계의 PZT tube에 인가하였다.

(3) 센서신호처리

clamp에 의해 유도된 측정전류의 주기를 구하기 위하여 간섭계에서 출력된 간섭무늬세기를 시간에 따라 미분하였다. 미분의 결과는 식 (6)과 같이된다.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I_0}{2} ad_{33}NV_0\omega \sin(\omega t) \sin \{ad_{33}NV_0\cos(\omega t)\} \quad (6)$$

만약, $ad_{33}NV_0 > 2\pi$ 이면, $ad_{33}NV_0\omega \sin(\omega t)$ 항은 $\sin \{ad_{33}NV_0\cos(\omega t)\}$ 의 항보다 더 천천히 변하여 미분한 값의 envelope를 형성하게된다. 간섭무늬의 세기를 시간에 대해 미분한 값의 envelope은 식 (7)과 같이 인가전압과 같은 주기를 갖는 함수로 나타난다.^[9]

$$E = \frac{I_0}{2} ad_{33}NV_0\omega \sin(\omega t) \quad (7)$$

그림 3은 clamp에 의해 변환된 교류 유도전압 5.76 V가 PZT tube에 가해질 때 센서에서 출력되는 간섭무늬세기신호이다. 일정 시간동안(교류전류의 반 주기동안) 간섭무늬의 개수가 변화하는 정도는 PZT에 가해지는 전압의 크기에 의존하며, 교류 전류의 주파수에는 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

그림 4의 (a)은 송전선에 전류가 흐를 때 clamp에 의해 생성된 교류 유도 전압의 파형이며, (b)은 유도전

압을 PZT 전극에 인가할 때 간섭계의 출력단에서 출력되는 간섭신호를 시간에 따라 미분한 신호이다. 인가전압이 최대 또는 최소값이될 때 미분값의 envelope는 0이된다. 즉, envelope의 값이 0이 되는 점 사이의 시간은 인가전압의 반주기가된다. 이 유도전압의 주기는 측정전류의 주기와 동일하므로 인가전압의 반주기 동안의 간섭무늬 변화개수를 셀 경우 측정교류전류의 주파수를 모르거나 주파수가 변화하더라도 주파수에 관계없이 전류값을 측정할 수 있다.

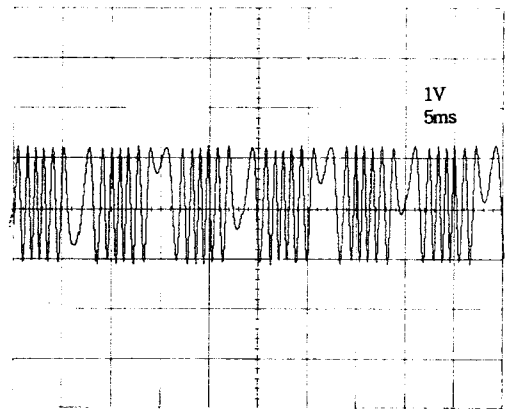


그림 3. 전류센서의 간섭무늬 출력신호

(교류 유도전압 5.76V이 PZT에 인가될때)

Fig. 3. Interferogram of the current sensor (when induced AC voltage 5.76V is applied to PZT)

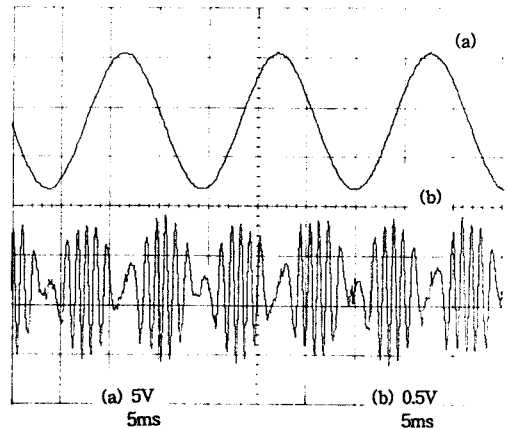


그림 4. PZT에 인가되는 유도전압(60Hz:4.84V)의 파형 및 미분신호

Fig. 4. Waveform of induced voltage applied to PZT and differential signal)

그림 5는 센서신호처리회로의 개략도이며 envelope의 값이 0이 될 때, 즉 인가전압이 최대 또는 최소인 경우에 reset신호가 발생되게 하여 counter를 조절함으로써 인가전압의 반주기동안 간섭무늬의 변화개수를 셀 수 있도록 하였다.

그림 6의 (a)은 간섭무늬세기신호이며, (b)은 (a)를 시간에 따라 미분한 신호를 이용하여 만들어진 counter의 reset신호이다. 이 신호 동안 간섭무늬의 개수를 카운터(counter)가 셀 수 있다.

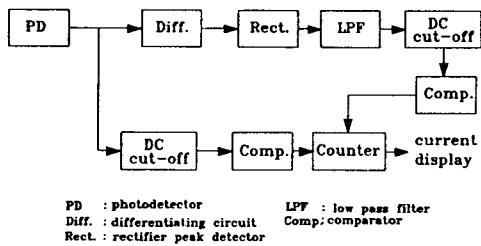


그림 5. 센서 신호처리회로의 개략도
Fig. 5. Schematic diagram of signal processing hardware

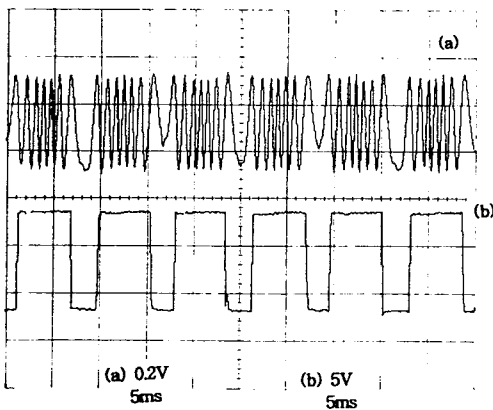


그림 6. 카운터의 reset신호
Fig. 6. Reset signal of the counter

(4) 전류센서의 특성

교류전류의 크기측정은 송전선의 전류를 0 A에서 400 A까지 변화시켰을 때, 출력되는 간섭무늬의 세기를 시간에 따라 미분하여 교류전류의 반 주기동안 간섭무늬변화개수를 세는 방법을 이용하였다. 송전선에 흐르는 전류는 디지털 전류미터(digital clamp, 모델 HIOKI 3261)를 사용하여 측정하였다.

그림 7은 전류변화에 따른 간섭무늬변화개수를 나

타낸 것이다. 전류측정 결과는 송전선의 전류변화에 대한 간섭무늬변화개수는 선형성을 갖고 변화였으며, 측정감도(sensitivity)는 0.862×10^{-3} fringes/A·turn로 나타났다. 또한, 전류센서의 안정도(stability)는 0.3%이내였다.

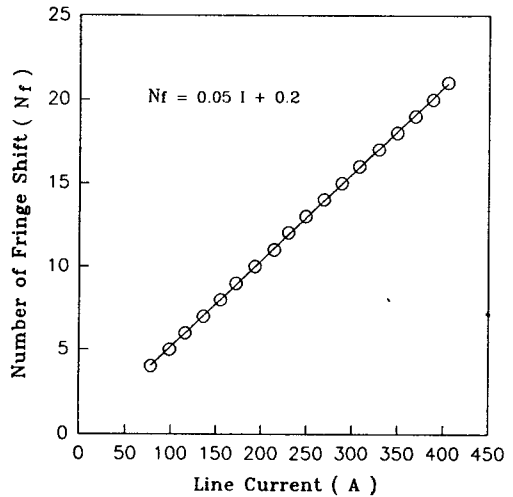


그림 7. 전류센서의 출력특성
(교류전류와 간섭무늬의 변화개수관계)

Fig. 7. Output characteristics of the current sensor
(Relationship between AC current and the variation of fringe numbers)

2. 온도에 대한 특성조사

전류센서의 온도특성은 냉장고(-20℃ ~ 16℃) 및 오븐(16℃ ~ 80℃)에서 실험하였으며, 기준 온도는 K-type 열전대와 Fluke51을 이용하여 측정하였다. 주파수 60 Hz, 크기 6.0 Vp-p의 일정한 교류전압하에서 온도변화에 따른 간섭무늬변화를 관측하였다. 미소 간섭무늬변화를 측정하기 위하여 오실로스코프(storage oscilloscope) 및 컴퓨터(486 PC)를 사용하였다.

그림 8은 온도변화에 따른 미소 간섭무늬변화를 관측하기 위한 신호처리시스템의 개략도이다. 온도변화에 따른 간섭무늬변화는 오실로스코프에 저장되며, 동시에 GPIB시스템을 통하여 컴퓨터로 전송된다. 간섭무늬는 전류의 크기에 따라 주파수가 변화하며, 전류의 크기변화가 없으면 일정한 주파수를 가진다. 온도변화에 따른 간섭무늬의 주파수변화는 FFT(fast fourier transform) 프로그램을 이용하여 간섭무늬의 미소한 주파수변화를 측정하였다. 이 측정결과는 그림 9와 같으며, 우측 세로축은 온도변화에 대한 간섭무늬의 주파수변화이며,

좌측 세로축은 간섭무늬의 개수 변화이다.

상온 이하에서는 측정감도는 온도변화에 관계없었으며, 상온이상에서는 일정한 온도범위에서 증가함을 볼 수 있다. -20℃에서 80℃사이의 온도변화에 따른 측정감도의 오차는 5% 이내였다.

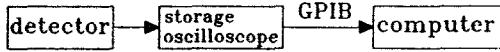


그림 8. 온도특성을 조사하기 위한 신호처리시스템의 개략도

Fig. 8. Schematic diagram of signal processing to investigate temperature characteristics

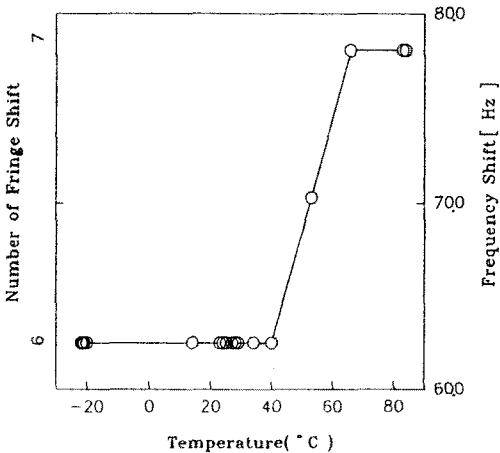


그림 9. 온도변화에 따른 센서의 출력특성

Fig. 9. Output characteristics of sensor with temperature

IV. 결론

인가전압에 의해 수축·팽창하는 원통형 PZT와 단일모드 광섬유를 이용한 마이켈슨 간섭계형 교류전류 센서를 제작하였다. 간섭무늬의 세기를 시간에 대해 미분하여 측정전류의 주기를 구하고, 측정전류의 반주기 동안 간섭무늬의 변화개수를 세는 원리를 이용하여 측정전류의 주파수변화에 무관하게 교류전류를 측정할 수 있는 신호처리장치를 제작하였다. 측정전류의 크기 변화에 대해 간섭무늬의 변화개수는 선형성을 갖고 변화하였으며, 측정감도는 0.862×10^{-3} fringes/A·turn으로 나타났다. 그러나 전류의 크기에 관계없이 ±1fringe의 오차를 가졌다.

온도특성 실험에서는 EC-64의 PZT tube를 사용하였을 경우, 오차는 5% (-20℃에서 80℃사이의 온도변화) 이내였다.

V. 참고 문헌

- [1] J. Aubin, Member, R. Bergon, R. Morin, "Distribution transformer over loading capability under cold-load pickup conditions", *IEEE Transaction Power Delivery*, Vol.5, No.4, pp. 1883~1889, 1990.
- [2] Edward A. ulmer, Jr. Member, "A high accuracy optical transducer for electric power systems", *IEEE Transaction Power Delivery*, Vol.5, No.2, pp.892~897, 1990.
- [3] T. Mitsui, K. Hosoe, H. Usami, S. Miyamoto, "Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic-field sensors", *IEEE Transaction power Delivery*, Vol. PWRD-2, No.1, pp.87~93, 1987.
- [4] T. Sawa, K. Kurosawa, T. Kaminishi, T. Yokota, "Development of optical transformer", *IEEE Transaction Power Delivery*, Vol.5, No.2, pp.884~891, 1990.
- [5] LIU Yang-Bing, Li Hong-Bin, ZHANG Wei-Jun, "Optical current transducer for electric power system", *SPIE Vol.2292, Fiber Optic and Laser Sensors XII*, pp.40~444, 1994.
- [6] Y. N. Ning, B. C. B. Chu, and D. A. Jackson, "Interrogation of a conventional current transformer by a fiber-optic interferometer", *Optics letters*, Vol.16, No.18, pp.1448~1450, 1991.
- [7] C. E. Lee and H. F. Taylor, "Fiber optic sensor research at Texas A&M University", *SPIE vol.1170*, pp.113~122, 1989.
- [8] Mario Martinelli, "Interferometric optical fiber sensors", *SPIE Vol.1983*, pp.1034~1051, 1982.
- [9] 김봉규, 김병운, 김만식, "간섭무늬의 변화갯수 측정을 이용한 광섬유 교류전압센서", *한국광학회지*, Vol.5, No.1, pp.158~165, 1994.

[10] Peter Haschberger, Oliver Mayer, Volker tank, and helmut Dietl, "Michelson ineterferometer with a rotating retroreflector:a Laboratory

model for environmental monitoring", *Applied Optics*, Vol.29, No.28, pp.4216~4488, 1990.

著 者 紹 介



김 창 원

1967년 12월 5일생. 1990년 영남대학교 물리학과 졸업. 1992년 영남대학교 대학원 물리학과 이학석사 학위취득. 1992년~현재 경북대학교 센서기술연구소 연구원. 주관심분야 : 광섬유센서, 실리콘

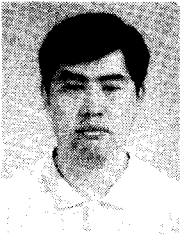
마이크로머시닝, 센서응용기술 등임.



이 정 희

1957년 6월 30일생. 1979년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1983년 경북대학교 대학원 전자공학과 공학석사학위취득. 1986년 Florida Institute Technology, Electrical and Computer Eng.에서 공학 석

사학위취득. 1990년 North Carolina State University, Electrical and Computer Eng.에서 공학박사학위취득. 1990년~1993년 한국전자통신연구소 선임연구원. 1993년~현재 경북대학교 전자공학과 조교수. 주관심분야 : 광섬유 센서, III-V족 화합물 반도체소자, 마이크로머시닝기술등임.



박 동 수

1964년 10월 7일생. 1987년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1989년 경북대학교 대학원 전자공학과 공학석사학위 취득. 1989년~현재 동대학원 박사과정. 주관심분야 : 광섬유센서, 실리콘 집적회로 제조 공정 등임.

강 신 원

『센서학회지 제4권 제1호』 논문95-4-1-05, p.34참조. 현재 경북대학교 센서기술연구소 전임강사.



김 명 규

1966년 3월 9일생. 1991년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1993년 경북대학교 대학원 전자공학과 공학석사학위 취득. 1993년~현재 동대학원 박사과정. 주관심분야 : 광섬유센서, 마이크로머시닝기술 등임.

손 병 기

『센서학회지 제1권 제1호』 논문92-10, p.92 참조. 현재 경북대학교 전자공학과 교수, 센서기술연구소장.