

중공 광섬유를 이용한 광섬유 간섭계형 전압센서

배정환 · 박재희[†]

계명대학교 전자공학과
☎ 704-701 대구시 달서구 신당동 1000

김경찬

계명대학교 물리학과
☎ 704-701 대구시 달서구 신당동 1000

김광택

호남대학교 전자공학과
☎ 506-090 광주시 광산구 어등로 330

한원택

광주과학기술원 정보기전공학과
☎ 500-712 광주시 북구 첨단과기로 261(오룡동)

(2007년 11월 5일 받음, 2008년 1월 8일 수정본 받음)

크기가 작고 감도가 높은 중공 광섬유를 이용한 In-Line 마이켈슨 간섭계형 전압 센서를 개발하였다. 개발된 In-Line 마이켈슨 간섭계는 끝 단면은 단일모드광섬유에 연결되어 있고 다른 끝 단면은 깨끗하게 절단된 지름이 4 um의 공기구멍을 가지고 있으며 길이가 10 mm인 중공 광섬유로 구성되어 있다. 개발된 In-Line 마이켈슨 간섭계를 PZT 위에 glue를 사용하여 고정시켜 In-Line 마이켈슨 간섭계형 전압 센서를 제작하였다. 제작된 센서는 60 Hz의 AC 전압을 인가하였을 때 출력파형의 주파수는 인가전압의 크기에 비례하였다. 그리고 출력파형의 위상은 인가전압의 크기와 거의 선형적인 관계에 있었으며 센서의 감도는 0.065π radian/V였다.

주제어 : Optical fiber voltage sensor, Hollow fiber

I. 서 론

최근 광섬유를 이용한 많은 종류의 광 부품 들이 산업용, 의료용, 군사용등 사회전반에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있으며 그 중에서 광섬유를 이용한 센서 개발에 대한 관심이 나날이 증가하고 있다.^[1] 광섬유를 이용한 센서는 광섬유 센서 그 자체가 센서로서의 역할뿐만 아니라 신호의 전송역할을 동시에 수행할 수 있어 기존의 전자센서(물리적, 화학적, 전기적)들과 비교하여 감도가 높고, 감지속도가 빠르고, 전자파에 영향을 받지 않고, 넓은 범위를 감지할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 특히 전자센서의 사용이 불가능한 위해한 환경에서도 광섬유 센서의 사용이 가능하기 때문에 많은 종류의 광섬유 센서들이 개발되어지고 있다.^[2]

광섬유 센서들은 크게 강도형 센서, 간섭계형 센서, 및 광섬유 격자센서로 나누어지며, 높은 센싱 감도가 요구되는 곳에서 간섭계형 센서가 많이 사용된다. 광섬유 간섭계형 센서는 마이켈슨(Michelson), 마하젠더(Mach-Zehnder), 샤냐(Sagnac), 패브리-페로(Fabry-Perot)간섭계 등을 사용하여 개발되어졌다.^[3] 마이켈슨, 마하젠더, 및 샤냐 간섭계 센서는 reference arm을

가지거나 sensing arm의 길이가 길어서 좁은 지역의 외부환경 변화를 감지하기가 어렵다.^[4] 그래서 좁은 지역의 온도, 압력등과 같은 물리적인 양을 측정하기 위해서는 패브리-페로 간섭계 센서의 사용이 적합하다. 광섬유 패브리-페로 간섭계 센서는 크게 intrinsic 패브리-페로 간섭계 센서와 extrinsic 패브리-페로 간섭계 센서로 나누어진다. 광섬유 extrinsic 패브리-페로 간섭계 센서^[5]는 센싱길이가 적어 광섬유 intrinsic 패브리-페로 간섭계 센서보다 감도가 낮다. 광섬유 intrinsic 패브리-페로 간섭계 센서는 TiO₂ 물질이 코팅된 광섬유 거울,^[6] 두 개의 단일모드 광섬유 사이의 멀티모드 광섬유,^[7] 코어사이즈가 다른 두 개의 광섬유^[8] 및 공기코어를 가진 photonic crystal fiber^[9] 등을 이용하여 제작되어졌다. 이들 Intrinsic 간섭계 센서들은 제작이 어렵거나, 삽입손실이 크거나, 반사율이 매우 작은 거울들의 형성으로 인한 신호처리의 어려움이 있다.

전송선과 변전소와 같은 전력시스템이 눈부시게 발전하고 있다. 이런 전력시스템의 발전이 전력 시스템에서 기본적으로 측정되어야 될 전압측정 기술의 발전을 유도해왔다. 기존의 전자방식의 전압 측정 기술로는 컴퓨터로 실시간 전압 측정 및 제어를 수행할 수 없다. 그래서 광섬유 센서를 이용한 전압 측정 및 제어 기술 개발에 많은 노력을 기울여 왔다. 수정의 pockels 효과를 이용한 광섬유전압센서^[10]가 개발되어

[†]E-mail: jpark@kmu.ac.kr

졌다. 이 센서는 실시간 전압 측정이 가능하나 감도가 낮다. 광섬유 마이켈슨 간섭계^[11]와 광섬유 마젠더 간섭계^[12]의 센싱 아암을 PZT에 감은 광섬유 전압 센서가 개발되어졌다. 이 센서들은 기준 아암이 있고 센싱 아암의 길이가 길어 주변 환경 노이즈에 영향을 많이 받아 정확한 측정이 어렵다. 광섬유격자를 PZT위에 부착한 광섬유 전압센서^[13]가 개발되어졌다. 이 센서는 감도도 높지 않고, 고가이고, 신호처리가 어려운 문제점들을 가지고 있다. 그래서 본 연구에서는 모양이 페브리-페로 간섭계와 유사하여 크기도 작고, 감도도 높은 중공광섬유를 이용한 In-Line 마이켈슨 간섭계를 제작하고 이를 이용하여 AC 전압을 측정하는 센서를 개발하였다. In-Line 마이켈슨 간섭계 전압센서는 단일모드 광섬유에 한 면이 부착되어있고 다른 끝 단면은 깨끗하게 절단된 중공광섬유로 구성된 In-Line 마이켈슨 간섭계가 PZT위에 고정되어 있는 형태를 하고 있다.

II. 이 론

In-Line 마이켈슨 간섭계(그림 1)는 빛을 전달하는 역할을 하는 단일모드 광섬유(SMF)에 한 면이 부착되어있고 다른 끝 단면은 깨끗하게 절단된 센서 역할을 수행하는 중공광섬유(HOF)로 구성 되어져 있다. In-Line 마이켈슨 간섭계에 사용되는 중공 광섬유^[14]는 클래딩, 코어, 및 광축에 따라 중앙에 있는 공기구멍으로 구성이 되어 있으며 공기구멍은 클래딩 역할을 하기 때문에 빛은 코어 영역으로만 전파 된다. 간섭계의 첫 번째 거울은 SMF와 HOF가 붙어 있는 중앙의 광섬유-공기의 경계면에 생성되고, 두 번째 거울은 HOF의 수직 절단된 단면에서 광섬유-공기의 경계면에 만들어진다. 첫 번째 거울에서는 SMF에서 진행되던 코어모드의 빛(I_i)은 링모드로 변환되어 HOF로 전파되고, 일부의 빛(I₁)은 반사된다. HOF로 진행하던 링모드 빛은 HOF 끝 단면에서 반사(I₂)되어 다시 첫 번째 거울로 돌아온다. 첫 번째 거울로 돌아온 링모드 빛은 첫 번째 거울에서 반사된 코어모드 빛과 만나 서로 간섭현상을 일으킨다. 간섭신호와 위상 변화에 대한 수식^[15]들은 아래와 같다.

$$I_r = I_i [R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\Phi] \tag{1}$$

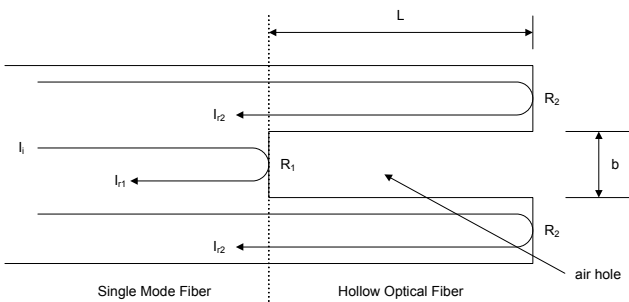


그림 1. In-Line 마이켈슨 간섭계.

$$\Phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \tag{2}$$

여기서 I_i은 입력광량, I_r은 출력광량, n은 광섬유의 반사율, L은 센서의 길이, λ은 광 파장, R₁은 SMF와 HOF의 접속면의 반사율($\frac{I_{r1}}{I_i}$), R₂은 HOF와 공기와의 반사율($\frac{I_{r2}}{I_i}$)이다. 이 수식들로부터 출력파형은 간섭계의 광 길이(길이와 굴절율)의 함수임을 알 수 있다.

In-Line 마이켈슨 간섭계 전압센서는 그림 2에 있다. 전압센서는 In-Line 마이켈슨 간섭계가 PZT위에 glue를 사용하여 부착된 구조를 가지고 있다. PZT에 전압을 인가하면 광섬유 간섭계 센서의 광 길이가 변화하고 이 광 길이의 변화가 간섭계 신호의 위상변화를 유도하여 간섭계 출력신호를 변화시킨다. 인가 AC 전압에 대한 광섬유 센서 출력의 위상변화^[16]는 아래와 같다.

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \left(\frac{\gamma}{M} \right) \left[1 + \frac{1}{2} n^2 (2\nu\beta - \alpha) \right] V \cos\omega t \tag{3}$$

여기서 V는 인가 전압의 크기, M은 PZT 전극 사이의 거리, γ는 PZT 변형계수, ν는 poisson's ratio, ω는 각속도, α는 strain-optic tensor의 1행1열 요소이고, β는 strain-optic tensor의 1행2열 요소이다. 이 수식으로부터 위상변화는 인가전압의 크기에 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

III. 실험 및 결과

센서는 SMF와 HOF로 이루어진 In-Line 마이켈슨 간섭계가 PZT위에 부착된 구조를 가지고 있다. 센서를 제작(그림 3)하기 위해 먼저 SMF와 HOF를 사용하여 In-Line 마이켈슨 간섭계를 제작한다. In-Line 마이켈슨 간섭계의 제작은 용융접합, 수직절단 순으로 이루어진다. 용융접합 과정에서는 제일 먼저 HOF와 SMF의 피복을 제거한 후 광섬유 절단기(fiber cutter)를 사용하여 광섬유를 수직으로 절단한다. 그리고 에탄올 등을 이용하여 광섬유 표면의 불순물을 제거한다. 깨끗하게 절단된 SMF와 HOF를 용융접합기를 사용하여 접합시

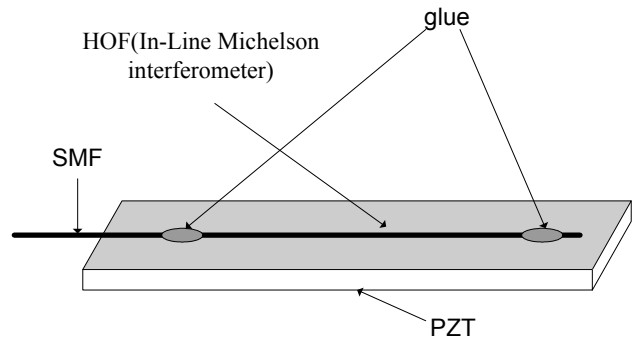


그림 2. 전압센서의 계략도.

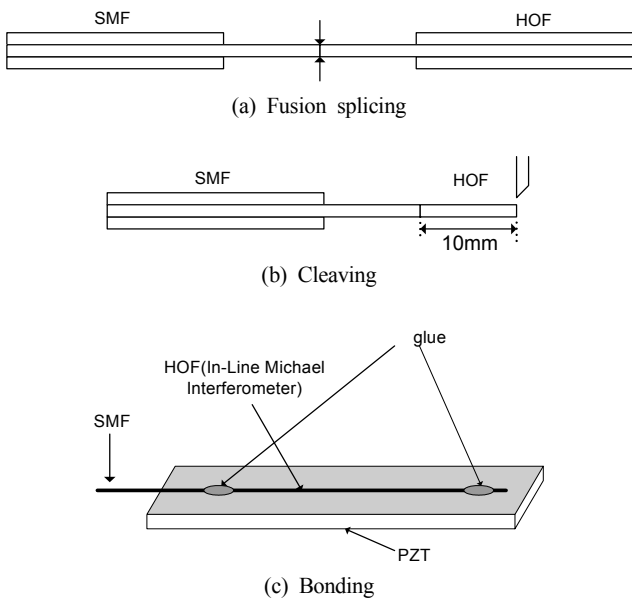


그림 3. 센서의 제작순서.

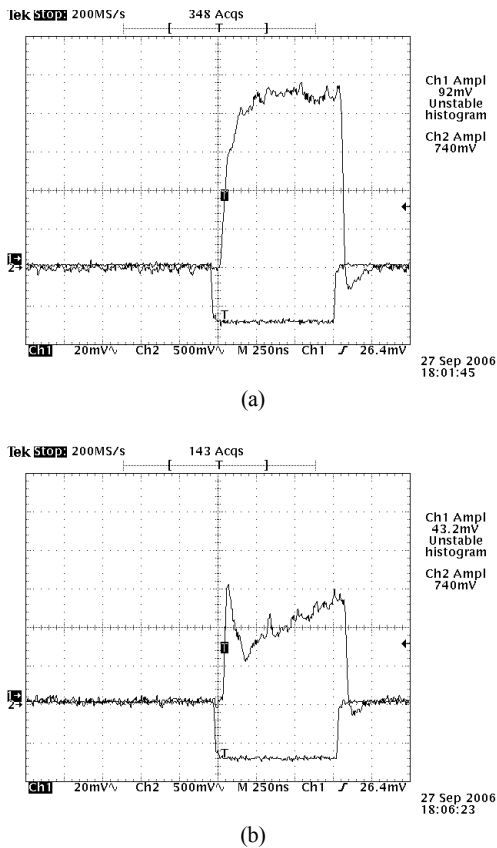


그림 4. 광원을 펄스변조시 간섭계의 출력신호.

킨다. 접합을 하기 위해 사용한 용융접합기의 arc 전류와 arc 방전시간은 SMF를 연결할 때 사용하는 값보다 적은 값을 사용하여 수동으로 접합한다. 접합된 광섬유에 접합부위에서 일정한 거리에 광섬유 절단기를 사용하여 수직으로 깨끗하

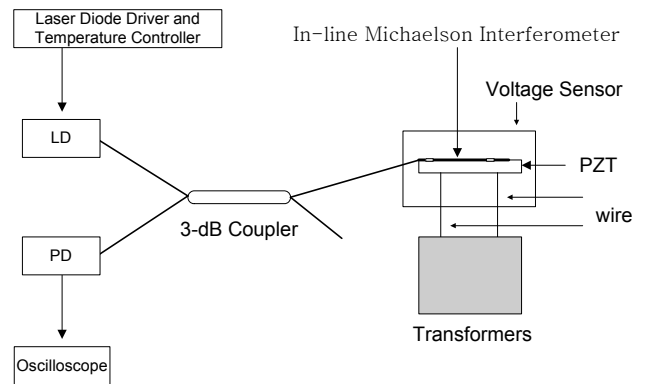


그림 5. 실험장치.

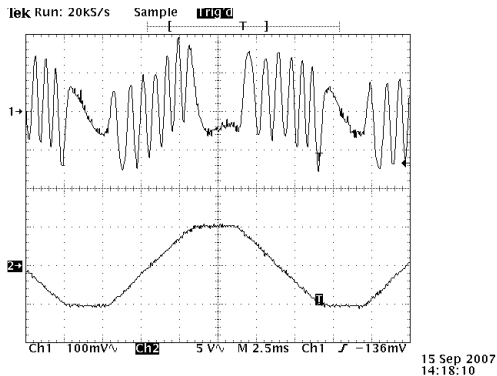
게 절단하여 In-Line 마이켈슨 간섭계센서가 제작된다. 그림 4는 광원을 펄스 변조 했을 때 In-Line 마이켈슨 간섭계의 출력 신호들이다. 그림 4로부터 제작된 In-Line 마이켈슨 간섭계의 출력 신호의 Visibility는 0.8이다.

In-Line 마이켈슨 간섭계를 제작한 후 마이켈슨 간섭계를 PZT위에 두고 super glue를 사용하여 PZT위에 고정을 함으로써 센서 제작이 완료된다. 본 실험에서 사용된 In-Line 마이켈슨 간섭계는 4 um의 공기구멍을 가진 HOF를 사용하여 제작되었으며 제작된 간섭계의 길이는 10 mm였다. 간섭계가 부착된 PZT의 크기는 40 mm × 15 mm × 5 mm였다.

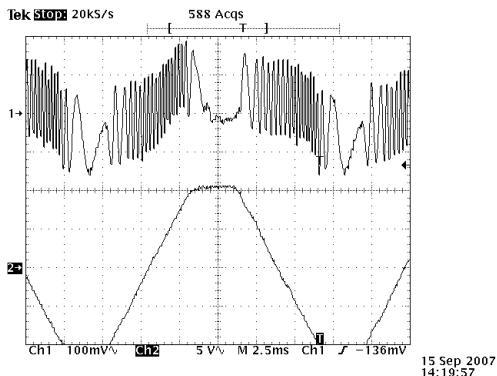
광섬유 간섭계형 센서 측정 실험 장치는 그림 5와 같다. 실험 장치는 1.3 um DFB Laser(LD, Lucent Technologies D2300), Photo detector(PD, Lasertron DFT-005-001), 전류 공급 및 온도 제어장치(엠텍 Max500 mA), 간섭계형 전압 센서, 오실로스코프, 500 V까지 60 Hz 정현파 전압 공급이 가능한 변압기로 구성되어 있다. 그리고 온도 및 전류 변화에 따라 레이징 주파수와 광량이 변하기 때문에 레이징 주파수와 광량을 일정하게 해주기 위해 전류 공급 및 온도제어장치를 사용하여 15 mA의 정전류를 공급하였고, Laser의 온도를 25°C로 고정시켰다.

전류공급 및 온도 제어장치에서 Laser에 bias current를 공급하면 Laser에서 빛이 나온다. Laser에서 방출된 빛은 3-dB coupler를 거쳐 PZT에 접착된 간섭계형 전압센서에 도달한다. 전압센서에 도달한 빛은 그곳에서 간섭을 일으켜 3-dB coupler를 거쳐 photo detector로 되돌아온다. Photo detector에 되돌아 온 빛은 Photo detector에서 전기신호로 변환되어 오실로스코프에 나타난다. Transformer를 사용하여 60 HZ의 정현파 전압을 인가하면 PZT의 길이가 변화하게 된다. PZT의 길이 변화가 PZT에 부착된 간섭계의 길이를 변화시키고 이로 인하여 간섭 신호의 위상이 변화하게 된다. 간섭 신호의 위상 변화로부터 인가 전압의 크기를 알아낸다.

변압기를 사용하여 60 Hz 정현파 전압의 크기를 변화시키면서 출력 파형을 관찰하였다. 그림 6은 인가전압의 피크 투 피크 크기가 150 V 및 300 V일 때의 입력 전압과 출력파형이다. 이들 그림 6으로부터 입력 전압의 피크 투 피크의 크



(a)



(b)

그림 6. 60 Hz 정현파 전압의 크기를 변화시키면서 출력 파형.

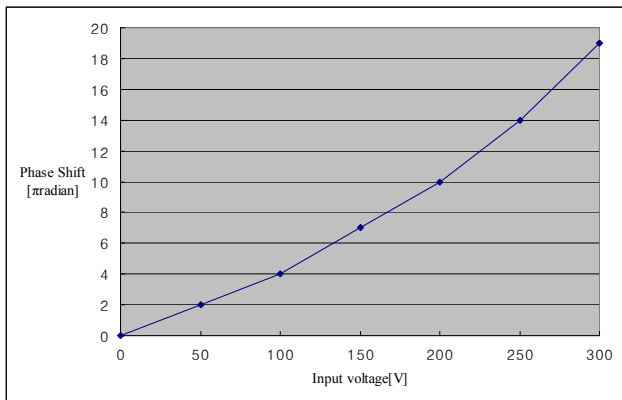


그림 7. 인가전압에 따른 출력 파형의 위상변화.

기가 클수록 주파수가 높은 출력 파형이 만들어짐을 알 수 있다. 그림 7은 60 Hz 정현파 전압의 피크 투 피크 크기를 0~300 V까지 변화 시키면서 위상 변화를 측정된 그래프이다. 그림 7은 인가전압의 피크 투 피크의 크기와 간섭 신호의 위상 변화는 거의 선형적인 관계가 있음을 보여주고 있으나 약간의 비선형성적인 특성도 있음을 보여주고 있다. 이 비선형적인 특성은 In-Line 마이켈슨 간섭계가 부착된 PZT의 비선형성에 의해 기인한 것이다. 측정 전압범위 내에서 더 선형성이 우수한 PZT를 사용할 경우 더 나은 선형성을

가진 광섬유 전압센서가 만들어 질수 있을 것으로 사려 된다. 개발된 광섬유 In-Line 마이켈슨 간섭계형 센서의 전압 측정 감도는 0.065π radian/V였다.

IV. 결론 및 고찰

현대 사회에서는 위험 지역에서의 물리적 요소와 화학적 요소의 측정에 대한 요구가 증대해 가고 있다. 그러나 기존의 전자센서는 전자파 등의 주변 환경에 영향을 많이 받아 위험 지역에서의 사용이 어려워 위험 지역에서의 사용이 가능한 광섬유 센서 개발에 많은 관심을 가져 왔다.

본 논문에서는 광축에 따라 광섬유 중앙에 지름이 4 um인 공기구멍을 가진 HOF를 SMF에 fusion splicing 기술을 사용하여 연결하고 다른 단면을 깨끗하게 절단함으로써 10 mm 길이의 In-Line 마이켈슨 간섭계를 제작하였다. 이를 PZT위에 glue를 사용하여 고정시켜 광섬유 간섭계형 전압센서를 개발하고 60 HZ의 정현파 전압의 피크 투 피트 전압을 측정하였다. 인가전압의 크기가 클수록 주파수가 높은 출력 간섭 파형이 만들어 졌으며 간섭 파형의 위상 변화는 인가전압의 피크 투 피크크기와 거의 선형적인 관계가 있었다. 그리고 개발된 전압 센서의 측정 감도는 0.065π radian/V였다.

앞으로 본 연구에서 개발된 센서를 사용하여 DC 전압 측정 및 저 전압을 측정 할 수 있는 기술들을 개발할 것이다. 더 나아가 In-Line 마이켈슨 간섭계 전압 센서용 신호처리 기술도 개발할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력혁신사업으로 수행한 연구결과임

참고문헌

- [1] 박성순, 박재희, 김경찬 “소형 퓨즈에 흐르는 전류 측정용 광섬유 페브리-페로 간섭형 센서,” *센서학회지*, 제14권 2호, pp. 91-95, 2005.
- [2] R. Willsch, “Application of optical fiber sensors: Technical and market trends,” *Proc. SPIE*, vol. 4074, pp. 24-31, 2000.
- [3] F. Yu and S. Yin, *Fiber optic sensors* (Marcel Dekker, New York, 2002), pp. 1-39.
- [4] X. Wan and H. Taylor, “Intrinsic fiber Fabry-perot temperature sensor with fiber Bragg grating mirrors,” *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 16, pp. 1388-1390, 2002.
- [5] V. Bhatia, M. Sen, K. Murphu, and R. Claus, “Wavelength-tracked white light interferometry for highly sensitive strain and temperature measurements,” *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 247-249, 1996.
- [6] C. Lee and H. Taylor, “Interferometric optical fiber sensors using internal mirrors,” *Electron. Lett.*, vol. 24, pp. 193-194, 1988.

- [7] Z. Huang, Y. Zhu, X. Chen, and A. Wang, "Intrinsic Fabry-perot Fiber Sensor for temperature and strain measurements," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 2403-2405, 2005.
- [8] W. Tsai and C. Lin, "A novel structure for the intrinsic Fabry-perot Fiber-optic Temperature Sensor," *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, pp. 682-686, 2001.
- [9] Y. Rao, "In-line Fiber-optic Etalon Formed by hollow-core photonic crystal fiber," in *Proc. of AOE 2007 Conf.*, pp. 124-126, 2007.
- [10] Y. Minyu, X. Yaoging, and L. Yanbiao, "Modification of optical fiber voltage sensor," in *Proc. of IEEE Region IO Conf. on Computer and Communication Systems*, pp. 109-110, 1990.
- [11] L. Leon, A. Diez, J. Cruz, and M. Andres, "Frequency-output fiber-optic Voltage Sensor for high-voltage line," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 996-998, 2001.
- [12] L. Fabiny, S. Vohra, and F. Bucholtz, "High-resolution fiber-optic Low-frequency Voltage sensor based on the Electrostrictive effect," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 952-953, 1993.
- [13] P. Niewczas, L. Dziuda, C. Fusiek, and J. McDonald, "Design and Valuation of a proprototype hybrid Fiber-optic Voltage sensor for a remotely interrogated Condition monitoring system," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 54, pp. 1560-1564, 2005.
- [14] K. Oh, S. Choi, Y. Jung, and J. Lee, "Novel hollow optical fibers and their applications in photonic devices for optical communications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, pp. 524-532, 2005.
- [15] 박재희, 김광택, "중공 광섬유를 이용한 광섬유 간섭계형 온도센서", *한국센서학회지*, 제16권 3호, pp. 192-196, 20007.
- [16] J. Park, "Buried fiber optic sensor," MS Thesis, Texas A&M university, College Station, 1992.

Fiber-Optic Inteferometric Voltage Sensor using a Hollow Fiber

Jeung Hwan Bae and Jaehee Park[†]

Keimyung University, Department of Electronics Engineering, 1000 Sindang-Dong, Dalseo-Gu, Daegu, Korea

[†]*E-mail: jpark@kmu.ac.kr*

Kyung-Chan Kim

Keimyung University, Department of Physics, 1000 Sindang-Dong, Dalseo-Gu, Daegu, Korea

Kwang-Taek Kim

Honam University, Department of Electronics Engineering, 59-1 Seobong-Dong, Gwangsan-Gu, Gwangju, Korea

Won-Taek Han

GIST, Department of Mechatronics, 261 Oryong-Dong, Buk-Gu, Gwangju, Korea

(Received November 5, 2007, Revised manuscript January 8, 2008)

A fiber-optic interferometric voltage sensor with high sensitivity is investigated. The fiber-optic voltage sensor is composed of an In-Line Michaelson interferometer bonded on a PZT. The In-Line Michaelson interferometer is a hollow optical fiber spliced to a single-mode fiber at one end and cleaved at the other end. The phase shift of the sensor output signal was induced by the applied AC voltage. The relation between the amplitude of the applied voltage and the phase shift of the sensor output signal was approximately linear and the sensitivity was 0.065π radian/V.