

소형 퓨즈에 흐르는 전류 측정용 광섬유 패브리-페로 간섭형 센서

박성순 · 박재희[†] · 김경찬*

Fiber Fabry-Perot interferometric sensor for the measurement of current flowing into a small fuse

Sung Sun Park, Jaehee Park[†], and Kyung Chan Kim*

Abstract

A fiber Fabry-Perot interferometric sensor for the measurement of current flowing into a small fuse have been studied. The proposed current sensor was fabricated with a fiber Fabry-Perot interferometer attached close to a fuse line inside a small fuse. The fiber Fabry-Perot interferometer used in the experiment had the 10 mm cavity length and the 3.5 % reflectance mirrors. The phase shift of the output signal of the current sensor was proportional to the square of current applied to the fuse and the sensitivity of the current sensor was 0.87 degree/mA². The experiment results show that this sensor can be used for measuring current flowing into the fuse.

Key Words : fiber Fabry-Perot interferometer, current sensor, small fuse

1. 서 론

최근 개발되어지는 광센서들은 산업용, 의료용, 군사용 등 사회 전반에 걸쳐서 광범위하게 사용되어지고 있다. 그 중에서 광섬유를 이용한 센서는 광섬유 자체가 센서의 역할과 신호의 전송 역할을 동시에 수행할 뿐만 아니라 기존의 전자센서(물리적, 전기적, 화학적) 비교하여 감지속도가 빠르고, 전자파에 영향을 받지 않고, 넓은 범위를 감지할 수 있다는 장점을 가지고 있다^[1]. 특히 전자센서를 사용하기 어려운 환경에서도 비교적 정확한 측정을 할 수 있기 때문에 광섬유 전류 센서를 포함한 다양한 광섬유 센서들이 개발 되어졌다.

특히 군사용 폭발물을 실험하기 위해서는 폭발물을 설치된 지역에서 상당히 멀리 떨어진 지점에서 일정크기의 전류를 폭발물 내부에 있는 퓨즈로 보내면 퓨즈가 끊어짐으로써 폭발물이 폭발한다. 전류를 제공하는 지점이 폭발물로부터 멀리 떨어져 있고 유선으로 전류가 제공되기 때문에 주변에 있는 RF신호들이 유선에

결합되어 원치 않는 전류를 만들게 된다. 이로 인하여 폭발물 시험 중 인명 손실이 일어나는 경우가 발생한다. 그래서 뇌관 퓨즈에 흐르는 주변 RF신호에 영향을 받지 않고 전류를 정확하게 측정할 수 있는 광섬유 전류센서개발의 필요성이 증가하여 왔다.

광섬유 전류센서는 Faraday 효과 혹은 전류가 온도, 압력과 같은 다른 물리량으로 변환되는 성질을 이용하여 개발되어져 왔다. 자기광학물질의 Faraday 효과와 멀티모드 광섬유의 빛의 운반 역할을 이용한 광섬유 전류 센서들이 개발되어 졌다^[2,3]. 그러나 이 센서들 높은 SNR과 낮은 온도 의존성을 가지고 부피가 커서 소형 퓨즈에 적용이 불가능하고 작은 전류 측정에 사용하기가 어렵다. 광섬유의 Faraday 효과를 이용한 광섬유 Sagnac 간섭계형전류 센서^[4,5]가 만들어 졌다. 개발된 센서에 전류를 인가하면 시계 방향으로 진행하는 빛과 반시계 방향으로 진행하는 빛의 편광상태가 변화하고 편광상태 변화가 간섭출력신호의 광위상 변화를 야기시키고 야기된 위상 변화로부터 인가된 전류를 알아내었다. 이 방식 역시 센서의 부피가 커서 소형의 퓨즈에 응용이 어렵다. Loop형태의 광섬유 끝단에 고 반사율의 거울을 부착한 반사형 광섬유 전류 센서가 개발 되어졌다^[6]. 반사형 센서는 빛이 광섬유를 따라 진행 하다가 광섬유 끝단에 있는 광섬유 거울을 만나면

대구시 달서구 신당동 1000 계명대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Keimyung University)

*대구시 달서구 신당동 1000 계명대학교 디자털물리학과(Dept. of Physics, Keimyung University)

[†]Corresponding author: jpark@kmu.ac.kr

(Received : April 2, 2004, Accepted : December 13, 2004)

송신부와 같은 방향에 있는 수신부로 돌아온다. 되돌아온 빛은 센서에 인가된 전류량에 따라 편광상태가 변화한 빛이기 때문에 반사형 센서는 수신된 빛의 편광상태로부터 전류를 측정하는 센서였다. 이 센서는 높은 측정 감도는 가지나 역시 부피가 커서 작을 불륨을 가지는 퓨즈에 적용은 매우 어렵다. 송전선에 흐르는 고 전류를 측정하기 위하여 광섬유 패브리-페로 간섭계(FFPI : Fiber Fabry-Perot Interferometer)를 PZT에 부착한 형태의 광섬유 전류 센서가 연구 되어졌다^[7]. 송전선에 흐르는 전류를 전압으로 변환한 뒤 PZT에 인가하면 PZT의 길이가 변화하고 PZT의 길이 변화가 FFPI의 광 길이를 변화시켜 FFPI 출력신호의 위상 변화를 야기 시켜 출력신호의 위상 변화로부터 인가전류의 크기를 알아내었다. 이런 형태의 전류센서는 고 전류 측정에는 활용할 수 있으나 소형 퓨즈에 흐르는 미소 전류 측정에 응용 할 수 없다. 그래서 본 연구에서는 새로운 소형퓨즈에 흐르는 전류를 측정할수 있는 FFPI 센서를 개발하였다.

2. 0 | 틀

본 연구에서는 퓨즈 내부에 있는 퓨즈선에 한개의 FFPI(그림 1)를 근접 설치하여 소형퓨즈에 흐르는 전류 측정은 하였다. 퓨즈선에 전류를 인가하면 인가 전류에 비례하여 퓨즈선의 온도가 증가하고 퓨즈선의 온도 상승이 FFPI의 광길이를 변화시켜 출력신호의 위상을 변화 시킨다. 그래서 퓨즈선의 온도 변화에 의해 유도되는 출력신호의 위상 변화로부터 퓨즈선의 인가된 전류를 알아낸다.

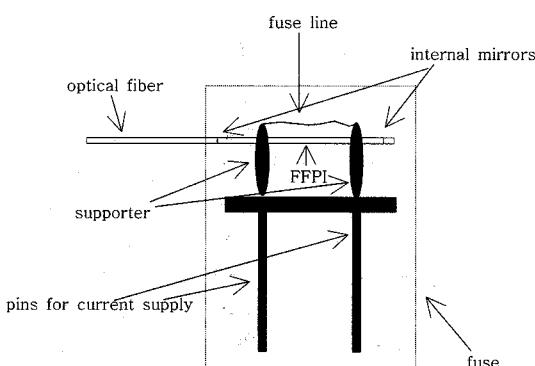


그림 1. 퓨즈에 흐르는 전류측정용 광섬유 패브리-페로 센서 모식도.

Fig. 1. A schematic diagram of the FFPI sensor for the measurement of current flowing into a fuse.

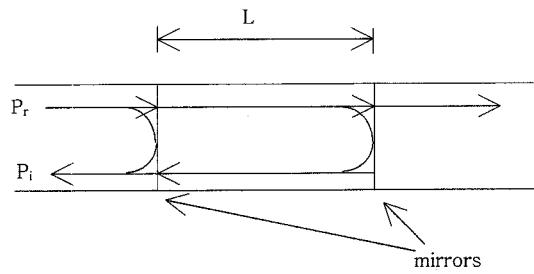


그림 2. 광섬유 패브리-페로 간섭계
Fig. 2. Fiber Fabry-Perot Interferometer.

그림 2에서 보여준 FFPI는 일정한 거리를 두고 있는 두 개의 내부거울들로 구성된다. 광섬유를 통해 진행하던 빛은 첫 번째 거울에서 일부의 빛은 반사되고 일부의 빛은 통과하게 된다. 통과한 일부의 빛은 다시 두 번째 거울에서 일부는 통과하고 일부는 반사하여 다시 첫 번째 거울로 돌아온다. 두 번째 거울에서 첫 번째 거울로 돌아온 빛은 일부는 첫 번째 거울을 통과해서 첫 번째 거울에서 반사된 빛을 만나 간섭을 일으킨다. FFPI의 간섭 출력 광 전력(P_r)과 위상^[8]은

$$P_r = 2R \cdot P_i (1 + \cos \Phi) \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (2)$$

이다. 여기서 R 은 두 거울의 반사율, P_i 는 입력광 전력, n 은 광섬유의 굴절률, L 은 FFPI의 길이, λ 는 빛의 파장이다. FFPI 주변의 온도가 변하면 광섬유의 굴절률과 FFPI의 길이가 변화하여 출력광 신호의 위상변화를 야기시킨다.

그림 1과 같이 FFPI를 퓨즈 선에 인접하여 설치한 뒤 퓨즈 선에 전류를 인가하면 퓨즈선의 온도가 상승하여 굴절율과 길이를 변화시켜 FFPI 출력신호의 위상 변화를 야기시킨다. FFPI의 주변온도 변화(ΔT)에 대한 위상변화는

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta T} \approx \frac{4\pi L dn}{\lambda} \approx \frac{4\pi \alpha dL}{\lambda} \quad (3)$$

이다. 위의 수식에서 온도변화에 따른 굴절율의 변화가 간섭계의 길이 변화보다 크기 때문에 길이 변화에 의한 위상변화를 무시하였다. 여기서 $\alpha = 1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 이다^[9,10]. 전류 I 를 퓨즈에 인가하였을 때 퓨즈의 온도변화^[11]는

$$\Delta T = \frac{GI^2 t}{mc} \quad (4)$$

이다. G 는 퓨즈선의 저항, m 은 퓨즈선의 질량, c 는 퓨즈의 비열, t 는 전류 인가 시간이다.

퓨즈에 인가된 전류에 대한 FFPI 출력 신호의 위상 변화는

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi\alpha L G I^2 t}{\lambda mc} \quad (5)$$

이다. 위의 수식으로부터 FFPI의 출력신호의 위상변화는 퓨즈의 인가 전류 I 의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

3. 실험 및 결과

FFPI는 일정한 거리를 두고 있는 두개의 내부거울들로 구성되어 있다. FFPI를 제작^[12-14]하기 위해서 먼저 광섬유 조각들의 끝단 면을 광섬유절단기(OFC-2000, Oxford)를 사용하여 깨끗하게 절단하고 절단된 면에 RF 스피터를 사용하여 TiO₂ 물질을 증착시킴으로써 광섬유 거울을 만든다. 그리고 TiO₂ 물질을 증착된 광섬유 조각의 끝 단면을 일반 광섬유 끝단에 붙이고 용착 접속기(Type-36, Sumitomo)를 사용하여 첫 번째 내부거울을 제작한다. 첫 번째 내부거울에서 일정한 거리를 두고 있는 지점에 광섬유를 깨끗하게 수직으로 절단한다. 절단된 면에 TiO₂ 물질이 증착된 광섬유 거울을 붙이고 첫 번째 내부거울과 같은 방법으로 두 번째 내부거울을 제조함으로써 FFPI를 제작한다. 내부거울들을 제작하기 위해 사용한 용착 접속기의 arc 전류와 arc 방전시간은 일반 광섬유를 연결하기 위해 사용하는 값보다 매우 적은 값을 사용한다. 위에서 설명한 방법에 따라 거울의 반사율은 3.5 %였고 cavity length는 10 mm인 FFPI를 제작하였다. 제작된 FFPI를 퓨즈선의 온도변화를 측정하기 위하여 퓨즈 내부에 있는 지지대 중 퓨즈선에 가장 근접해 있는 부분에 접착제를 사용하여 고정시켰다. 본 실험에서 사용된 퓨즈는 저항이 4 Ω인 Littelfuse사의 Microfuse 279이다.

실험 장치(그림 3)는 1.3 μm 파장의 레이저 다이오드(LD), Photo Detector(PD), 구동회로, 함수발생기(8116A, HP), personal computer(PC), FFPI 센서, 3 dB coupler, 전류공급장치로 구성되어 있다. 구동회로에서 LD에 구동전류를 공급하고 함수 발생기를 사용하여 LD에 펄스를 인가하면 펄스 변조된 빛이 LD에서 나온다. LD에서 방출된 빛은 3-dB coupler를 거쳐 FFPI로 간다. FFPI에 도달한 빛은 그곳에서 서로 간섭을 일으키고 3-dB coupler를 거쳐 PD로 되돌아온다. PD에 되돌아온 간섭빛은 PD에서 전기신호로 변환되어 PC로 입력된다. PC에서는 PD에서 보내온 전기신호로부터

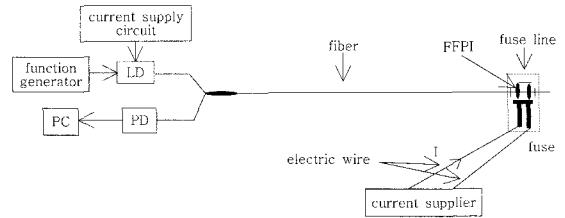


그림 3. 실험장치
Fig. 3. Experimental Setup.

FFPI의 간섭 출력신호의 위상변화를 측정한다. 전류 공급기를 사용하여 퓨즈의 전류공급단자를 통하여 퓨즈선에 전류를 인가하면 퓨즈선의 온도가 증가하다가 계속 전류를 증가하면 퓨즈선이 끊어진다. 퓨즈선에 인가된 전류에 의해서 퓨즈선의 온도가 변화하고 퓨즈선의 온도변화가 퓨즈 선에 근접 설치된 FFPI의 광길이의 변화 야기시킨다. 결론적으로 퓨즈선의 인가전류가 FFPI 전류센서의 출력 신호의 위상이 변화시킨다. 본 실험에서 진폭이 200 ns, 주기가 60 kHz, 펄스 크기가 1.7 V인 펄스를 함수 발생기에서 제공하였으며 15 mA의 구동전류를 구동 회로에서 공급하였다.

FFPI 센서를 이용한 퓨즈에 흐르는 전류측정은 전류 공급기를 사용하여 퓨즈의 전류공급 단자를 통하여 퓨즈에 전류를 공급하면서 PC를 사용하여 FFPI 센서 출력의 위상변화를 측정함으로써 수행되어졌다. 퓨즈에 전류인가는 처음 0 mA(전류차단상태)에서 10 mA로 증가시키고 10초 지난뒤 센서 출력의 위상 변화를 측정하고 인가된 전류를 차단하였다. 인가전류를 차단시킨 후 퓨즈가 최초상태로 돌아 올 때까지 기다렸다가 다시 20 mA의 전류를 인가하고 10초 후에 출력의 위상 변화를 측정한 뒤에 인가전류를 차단시켰다. 위의

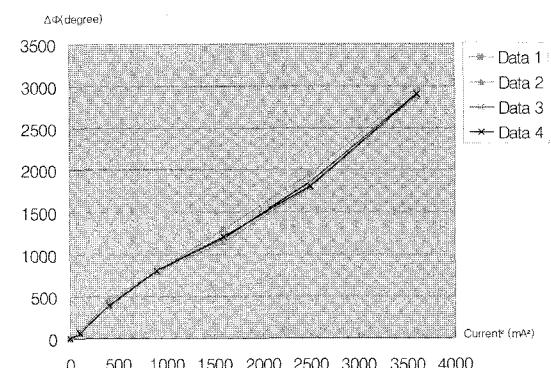


그림 4. 인가전류에 따른 위상변화
Fig. 4. Phase shift according to applied current

실험과정을 인가전류를 10 mA 단위로 60 mA가 될 때 까지 반복 수행하였다. 그리고 동일한 FFPI 센서와 퓨즈를 사용하여 동일한 실험을 4회 반복하였다. 그림 4는 퓨즈에 인가된 전류에 따른 FFPI 출력의 위상변화를 측정한 그래프이다. 실험결과들이 식 (5)에서와 같이 FFPI의 출력위상 변화와 퓨즈의 인가전류의 제곱과의 관계가 거의 선형적임을 보여주고 있으며 실험에서 사용된 FFPI 센서의 평균 측정감도는 약 0.87 degree/mA²임을 보여주고 있다. 연구 결과들로부터 FFPI 센서를 사용하여 퓨즈에 흐르는 전류를 측정할 수 있음을 알수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 주변 RF 신호에 영향을 받지 않고 퓨즈에 흐르는 전류를 광섬유 Fabry-Perot 간섭계(FFPI) 센서를 사용하여 측정하였다. 본 연구에서는 공진길이가 10 mm이고 두개 내부 거울의 반사율이 3.5 %인 광섬유 패브리-페로 간섭계 센서를 저항이 4 Ω인 Lit-telfuse사의 Microfuse 279 내부의 퓨즈 선에 근접 설치하여 퓨즈에 흐르는 전류를 측정하였다. 실험에 사용된 FFPI 센서 출력신호의 위상은 퓨즈에 인가되는 전류의 제곱에 비례하여 증가하였으며 센서의 평균 측정감도는 0.87 degree/ mA²이었다. 실험 결과로부터 FFPI 센서가 퓨즈에 흐르는 전류 측정에 사용될 수 있음을 알았다. 앞으로 센서 packaging, 센서신호처리, 및 노이즈 저감에대한 연구를 더 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 계명대학교 비사연구기금으로 이루어졌음.

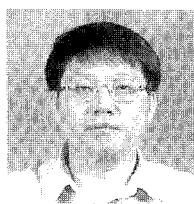
참고 문헌

- [1] T. Giallorenzi, J. Bucaro, A. Dandridge, G. Sigel, J. Cole, S. Rashleigh, and R. Prist, "Optical Fiber Sensor Technology", *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 20, pp. 626-665, 1982.
- [2] K. Kyuma, S. Tai, M. Nunoshita, T. Takioka, and Y. Ida, "Fiber optic measuring system for electric current by using a magnetooptic sensor", *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 18, pp. 1619-1623, 1982.
- [3] D. Gualtieri, S. Emo, and T. Kinney, "Bismuth rare-earth iron garnet composition for a magneto-optical wheel rotation rate sensor", *Journal of Applied Physics*, vol. 69, pp. 5978-5980, 1991.
- [4] J. Blake, P. Tantawadi, and R. Carvalho, "In-line Sagnac interferometer current sensor", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, pp. 116-121, 1996.
- [5] R. Patterson, A. Rose, D. Tang, and G. Day, "A fiber optic current sensor for aerospace applications", *IEEE AES Systems Magazine*, pp. 10-14, 1990.
- [6] K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, and H. Brandle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor", *Journal of LightwaveTechnology*, vol. 20, pp. 267-276, 2002.
- [7] Y. Park, W. Seo, C. Lee, and H. Taylor, "Fiber Fabry-Perot type optical current transducer with frequency ramped signal processing scheme", *Journal of Optical Society of Korea*, vol. 2, pp. 74-79, 1998.
- [8] 예윤희, 정환수, 나도성, "원격 측정을 위한 간섭형 광섬유 센서 시스템과 그의 압력 센서의 응용", *센서학회지*, 제6권, pp. 172-179, 1997.
- [9] C. Lee, Internal Mirror Technique for Fiber Optic Application, PhD Dissertation, Texas A&M University, College Station, 1988.
- [10] 백세종, 권일범, 정철, 유재황, "광섬유 ROTDR 센서를 이용한 침입 탐지기법의 개발", *센서학회지*, 제11권, pp. 209-217, 2002.
- [11] P. A. Tipler, 물리학, 청문각, 2001.
- [12] C. Lee and H. Taylor, "Interferometric optical fiber sensors using internal mirrors", *Electronics Letters*, vol. 24, pp. 193-194, 1988.
- [13] 이경진, 이호일, 박재희, 김명규, 강신원, "철근 콘크리트 구조물에 매설된 다중화 광섬유 압력센서", *센서학회지*, 제8권, pp. 22-28, 1999.
- [14] 정은주, 박재희, "스펙터 패턴을 이용한 반사형 광섬유 센서에 대한 연구", *센서학회지*, 제13권, pp. 121-127, 2004.



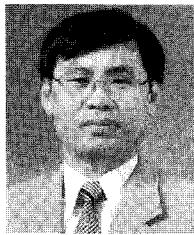
박 성 순 (朴 晟 淳)

- 1975년 6월 6일생
- 2003년 2월 경일대학교 전자공학과(학사)
- 2003년 ~ 현재 계명대학교 석사과정
- 주관심분야 : 광섬유 센서, 센서 신호처리



박 재 희 (朴 在 熙)

- 1962년 2월 17일생
- 1995년 8월 Texas A&M 대학 졸업(박사)
- 1997년 ~ 현재 계명대학교 부교수
- 주관심분야 : 광섬유 센서, 센서 신호처리



김 경 찬 (金 庚 燦)

- 1956년 3월 12일생
- 1978년 2월 경북대학교 물리학과 졸업 (학사)
- 1980년 9월 경북대학교 물리학과 졸업 (석사)
- 1988년 2월 경북대학교 물리학과 졸업 (박사)
- 1983년 ~ 현재 계명대학교 물리학과 교수
- 주관심분야 : 광섬유 센서, 광학계 설계