

## 팔라듐이 코팅된 광섬유 격자를 이용한 절연유속의 용존 수소가스 검출

김광택<sup>1,\*</sup> · 최누리<sup>2</sup> · 백세종<sup>2</sup>

### Detection of Hydrogen Gas Dissolved in Insulation Oil Based on Palladium-coated Fiber Bragg Grating

Kwang Taek Kim<sup>1,\*</sup>, Nu ri Choi<sup>1</sup>, and Se-Jong Baik<sup>2</sup>

#### Abstract

We have investigated a fiber-optic sensor for detecting the hydrogen gas dissolved in insulation oil based on a palladium (Pd)-coated fiber Bragg grating (FBG). As the palladium absorbs the hydrogen gas dissolved in the insulation oil, its volume expands and the Bragg wavelength shifts to a longer wavelength. The experimental results showed that the Bragg wavelength of FBG increased to 70 nm when the concentration of hydrogen dissolved in the insulation oil was 409 ppm.

**Keywords:** Hydrogen sensor, Fiber Bragg Grating, Palladium, Insulation oil

#### 1. 서 론

특고압용 변압기에 전기 절연을 위해 절연유가 사용된다. 변압기의 내부에 이상 현상 즉, 방전, 아킹, 국부과열등이 생기면 접촉한 절연유, 절연지, 프레스보드, 백크라이트 등의 절연재료가 열의 영향을 받아 분해하여 CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 등의 탄화수소가스를 발생하며 이 대부분의 가스들은 절연유에 용해된다[1-4]. 이러한 가스의 농도가 높아지면 절연유의 절연 특성이 나빠져 변압기의 고장을 발생시킨다. 변압기내의 절연유를 채취하여 가스크로마토 그래피 (gas chromatography) 방법으로 가스의 양과 조성에 따라 내부이상의 유무 및 그 정도를 추정할 수 있다. 이러한 변압기의 유중 가스분석 방법은 높은 신뢰성을 제공하지만 측정 분석에 큰 비용과 긴 시간이 필요하다. 한편 여러 가스 중 특히, 수소가스는 다른 gas와 비례하여 증가하는 특성이 있어 수소가스만을 검출하여 절연유내에 가스용해상태를 분석하는데 유용하게 이용된다[1].

광섬유형 수소 센서는 전기가 직접 흐를 필요가 없기 때문에

전기 방전에 의한 수소 폭발의 위험이 없고 전자과 장애가 발생하지 않으며 원거리 측정이 가능하여 현존하는 센서의 결점을 해결할 수 있다. 수소 검출 멤브레인으로 팔라듐(Palladium: Pd)은 수소에 대한 선택성이 높아 다양한 형태의 광섬유형 수소센서에 적용 되고 있다 [5-8].

본 논문은 절연유속에 용존 수소 농도를 측정하는 방법으로 팔라듐이 코팅된 광섬유 격자를 이용하는 방법을 도입하였다. 대기중의 수소농도를 측정하는 센서로 광섬유 격자를 이용하는 방법은 잘 알려져 있다. 수소가스가 광섬유 격자위에 코팅된 팔라듐에 침투하면 팔라듐이 팽창하여 광섬유 격자가 늘어나게 된다. 결과적으로 광섬유 격자 간격이 늘어나서 광섬유 격자의 브래그 파장이 장파장으로 이동하는 현상을 이용하여 수소 검출 센서로 활용 가능하다. 본 실험을 통해 감도를 높이는 방법으로 광섬유 클래딩을 식각하여 얇게 하면 팔라듐의 팽창이 광섬유 격자에 더 효과적으로 전달되어 수소농도에 따른 브래그 파장의 이동감도가 높아지는 것을 확인 하였다.

#### 2. 구조 및 동작 원리

Fig. 1은 본 논문에서 제안된 절연유속의 수소 농도 측정용 센서구조 이다. 절연유에 용해된 수소 분자가 팔라듐에 노출되면 수소분자는 원자로 분리되어 팔라듐 내부로 침투하게 된다. 수소가 팔라듐에 침투하면 팔라듐의 팽창으로 광섬유도 같이 팽창하고 광섬유 격자의 간격이 변하게 된다. 제안된 센서 소자에서 광섬유 격자 부분의 클래딩 두께는 처음 125 μm 인데 이를 식각(etching)하여 클래딩 두께를 줄인다. 광섬유 클래딩을 식각

<sup>1</sup> 호남대학교 전자공학과(Electronic Engineering, Honam University)417, Eodeung-daero, Gwangngju 62399

<sup>2</sup> 전남대학교 물리학과(Department of Physics, Chonnam National University) 77, 45, Yongbong-ro Buk-gu Gwangju 61168

\*Corresponding author: ktkim@honam.ac.kr

(Received: Aug. 14, 2018, Revised: Nov. 24, 2018, Accepted: Nov. 27, 2018)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

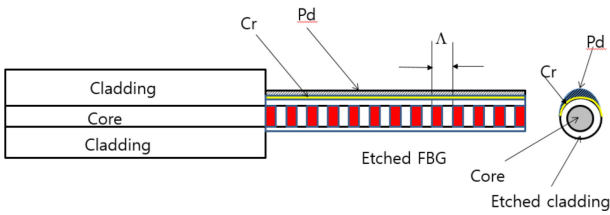


Fig. 1. Hydrogen sensor structure using Pd coated FBG.

하면 가늘어져 팔라듐의 팽창이 광섬유의 팽창으로 쉽게 전달 된다. 광섬유 격자의 간격과 브래그 파장(Bragg wavelength)사이의 관계는 아래 식으로 주어진다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

여기서  $n_{eff}$ 는 광섬유의 유효 굴절률,  $\Lambda$ 은 광섬유 격자의 간격을 의미한다. 브래그 파장에서 가장 큰 반사를 일으킨다. 광섬유 클래딩을 식각 할 때 주의할 점은 식각 과정에서 클래딩 두께를 지나치게 가늘게 하면 광섬유 모드가 소멸장( evanescent field)에 의해 팔라듐 박막에 의해 흡수된다[9]. 통신용 단일모드 광섬유의 경우 식각 후 클래딩의 두께가 20  $\mu\text{m}$  이하이면 이런 현상이 발생할 수 있다. 그림1의 구조에서 Cr층은 광섬유와 팔라듐 사이의 접착력을 높이기 위한 층이며 이더 최소한의 두께로 증착 한다.

### 3. 특성측정 및 분석

실험에 사용된 광섬유는 코어지름 8.2  $\mu\text{m}$  이고 클래딩 외경이 125  $\mu\text{m}$ 인 통신용 단일모드 광섬유를 사용하였다. 실온에서 브래그 파장은 1550 nm 근처로 제작하였다. 격자가 새겨진 길이는 10 mm 이며 한쪽 끝 단을 자른 후 HF와 증류수를 1:1로 희석한 용액으로 광섬유 클래딩을 습식식각(wet etching)하였다. 실온에서 식각 속도는 약 0.26  $\mu\text{m}/\text{min}$ .으로 나타났다. Fig. 2 는 광섬유 식각하기 전 후 클래딩 두께를 비교한 사진이다. 실험에는 식각 전의 클래딩이 125  $\mu\text{m}$  인 광섬유 격자와 식각 후 클래딩의 두께가 약 30  $\mu\text{m}$ 인 두께의 광섬유 격자를 사용하여 그 특성을 비교하였다. 식각된 광섬유 클래딩의 한 쪽 면에 Cr 2 nm 와 Pd 147 nm 를 증착하였다. Fig. 3은 증착된 Pd 필름의 두께 측정을 위한 Scanning Electron Microscope (SEM) 사진이다.

제작된 광섬유 격자형 수소센서가 절연유속에 녹아 있는 수소를 검출할 수 있는지 실험으로 확인하기 위하여 Fig. 4과 같이 실험장치를 구성하였다. Fig. 4과 같이 절연유에 수소와 질소 혼합가스 (질소 96%+질소 4%) 를 주입하면서 시간에 따른 센서의 반응을 검출하였다. 유량계를 통해 주입되는 가스량은 분당 약 0.2 L가 되도록 주입 속도를 조절하였으며, 핫플레이트(hot plate)로 절연유의 온도를 21°C로 설정하였다. 실험에 사용된 절연유는 동남석유공업(주)의 B10TRAN35 모델이었다.

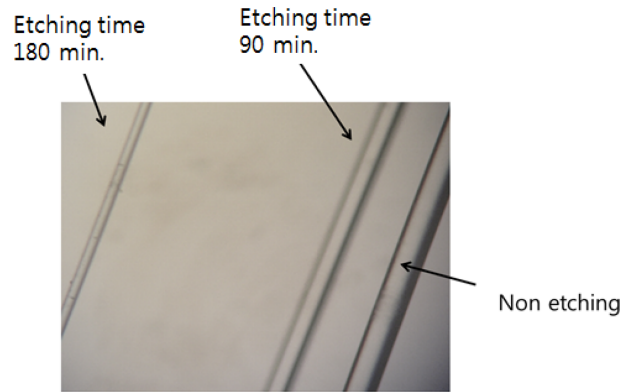


Fig. 2. Picture of optical fiber before and after etching.

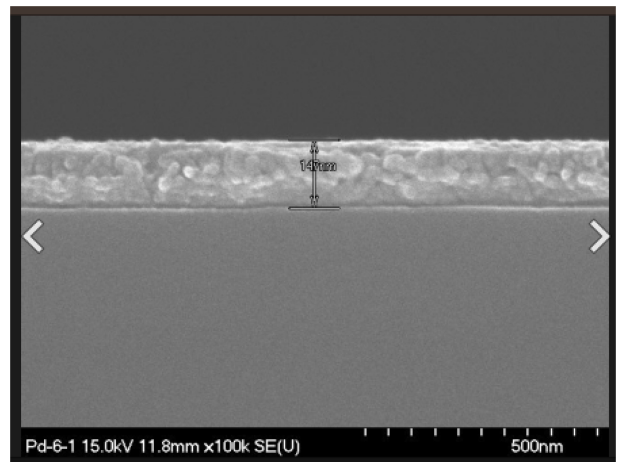


Fig. 3. Scanning Electron Microscope (SEM) of Pd film coated on optical fiber.

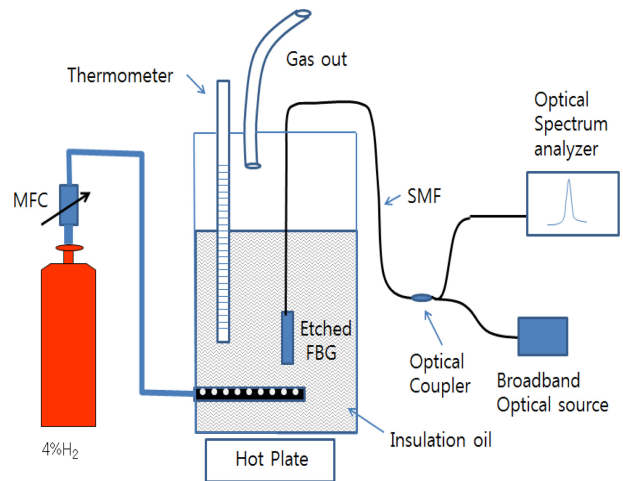


Fig. 4. Experimental set-up to test hydrogen detection in insulation oil using a FBG.

수소가스를 절연유에 골고루 빠르게 녹이기 위해 구멍이 여러 개 파인 관을 이용해 절연유 속으로 침투시켰다. 시간이 지남에 따라 절연유속의 수소가 포화 될 때까지 절연유속의 수소농도

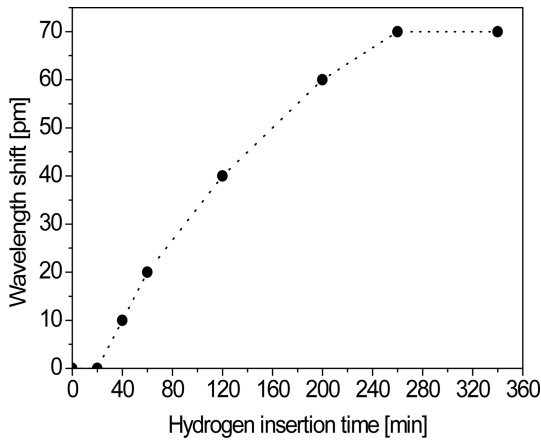
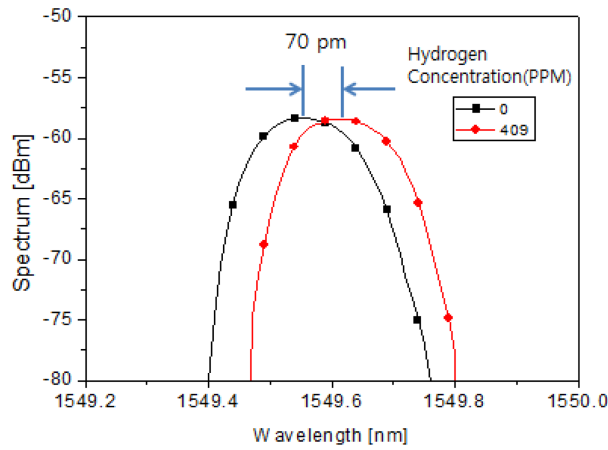
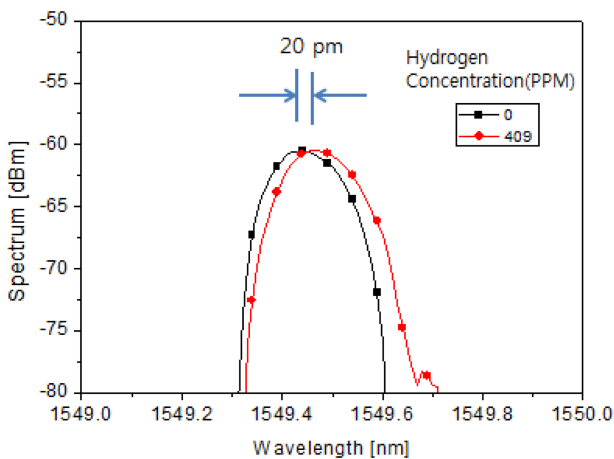


Fig. 5. Bragg wavelength shift in accordance with hydrogen insertion time in insulation oil.



(a)



(b)

Fig. 6. Reflection spectrum of palladium coated fiber Bragg grating before and after hydrogen insertion in insulation oil. (a) 30 mm of cladding diameter device. (b) 125 mm of cladding diameter.

가 서서히 증가한다. 절연유가 담긴 용기 내부 기압은 대기압상태로 유지되도록 하였다.

Fig. 5는 클래딩이 30  $\mu\text{m}$ 소자를 이용하여 수소 주입하기 시작한 후 시간 경과에 따른 브래그 파장을 광스펙트럼 분석기 (optical spectrum analyzer) 로 측정 한 결과이다 21°C에서 수소 주입 후 포화되는 데 까지 4시간 이상 소요됨을 알 수 있다. 시간이 지남에 따라 수소농도가 변압기용 절연유에 포화상태로 되었을 때 브래그 파장은 약 70 nm 이동하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6(a)는 식각을 통해 클래딩 두께가 30  $\mu\text{m}$  소자의 수소주입 전후의 브래그 파장으로 이동 간격은 70 pm이다. 그림6(b)를 통해서 알 수 있듯이 식각 하지 않은 소자의 경우 브래그 파장 이동은 20 pm 로 식각한 소자의 이동 거리의 1/3 이하로 측정되었다. 광섬유 클래딩 식각을 통해 감도를 더 높일 수 있다는 사실을 알 수 있다. 절연유에 녹아 있는 수소 농도가 포화되었을 때 절연유를 채취하여 gas chromatography 장치를 이용하여 수소농도를 측정 한 결과 409 ppm으로 나타났다.

본 논문으로 알 수 있는 사실은 팔라듐이 코팅된 광섬유격자를 이용한 수소감지기는 대기중이 있는 수소가스뿐 만 아니라 절연유 속에 녹아 있는 수소가스 검출도 가능함을 알 수 확인할 수 있었다. 광섬유 격자를 이용한 수소 검출의 감도는 여러 변수에 의해 개선될 여지가 있을 것으로 보인다. 팔라듐의 두께와 식각된 광섬유 클래딩의 두께도 중요한 변수로 작용할 것이다. 향후 이러한 소자 구조 변수가 감도에 미치는 영향과 주위 온도가 센서 특성이 미치는 영향 등은 계속 연구할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

절연유속에 용해된 수소가스를 검출하는 기술은 고가의 특고압 변압기의 유지 관리에 중요한 기술이다. 본 논문에서는 광섬유 격자를 식각하고 그 위에 팔라듐을 코팅하여 절연유에 용해된 수소가스 검출이 가능함을 보였다. 팔라듐이 수소를 흡수하면 팽창하는 특성을 이용하여 광섬유 격자의 이동현상을 관측하였다. 광섬유 격자의 클래딩을 식각하여 감도를 높일 수 있음을 확인하였다. 향후 감도를 개선하는 연구와 신뢰성을 분석하는 추가 연구가 필요하겠다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업 성과임(NRF-2016H1D5A1910658).

#### REFERENCES

[1] C. H. Nam “Diagnosis technology of abnormality in transformer based on dissolved hydrogen gas in insulation oil”,

- Journal of the Korea electric association*, Vol. 22, No. 2, pp. 18-25, 1994.
- [2] H. D. Lee, D. H. Lee, Y. H. Lee, K. H. Park, K. Y. Ryu, Y. S. Sin, "The Response Characteristic of Hydrogen Gas Detecting Sensor by Power Transformer deterioration" proceedings of KIEE 2004, 7.14-16
- [3] G.-M. Ma, C.-R. Li, R.-D. Mu, J. Jiang, and Y.-T. Luo, "Fiber Bragg grating sensor for hydrogen detection in power transformers" *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 21, No. 1, pp. 380-3852, 2014.
- [4] J. Bodzenta, B. Burak, Z. Gacek, W. P. Jakubik, S. Kochowski, and S. M. Urbańczyk, "Thin palladium film as a sensor of hydrogen gas dissolved in transformer oil", *Sens. Actuators B*, Vol. 87, No. 1, pp. 82-87, 2002.
- [5] M. A. Bulter, "Micromirror optical-fiber hydrogen sensor", *Sens. Actuators B*, Vol. 22, No. 2 pp. 155-163, 1994.
- [6] M. Tabib-Azar, B. Sutapun, R. Petrisk, and A. Kazemi, "Highly sensitive hydrogen sensors using palladium coated fiber optics with exposed cores and evanescent field interactions", *Sens. Actuators B*, Vol. 58, No. 1-2, pp. 158-163, 1999.
- [7] B. Sutapun, M. Tabib-Azar, and A. Kazemi, "Pd-coated elastootic fiber Bragg grating sensors for multiplexed hydrogen sensors", *Sens. Actuators B*, Vol. 60, No. 1, pp. 27-34, 1999.
- [8] D. Zalvidea, A. Diez, J. L. Cruz, and M. V. Andres, "Hydrogen sensor based on a fibre-taper with improved time-response", *Sens. Actuators B*, Vol. 114, No. 1, pp. 286-274, 2006.
- [9] K. T. Kim, "Measurement of Thermo-Optic Coefficient of a Liquid Using a Cascade of Two Different Fiber Bragg Gratings", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 22, No. 2, pp. 95-99, 2013.