논문 2010-47SD-7-4

광섬유 격자와 포토닉 밴드갭 광섬유를 이용한 아세틸렌가스 검출

(Optical Acetylene Gas Detection using a Photonic Bandgap Fiber and Fiber Bragg Grating)

이 윤 규*, 이 경 식**

(Yun Kyu Lee and Kyung Shik Lee)

요 약

할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유(hollow core photonic bandgap fiber, HC-PBGF)와 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG)를 이용하여 새로운 형태의 가스 검출 방식을 제안하였다. 제안하는 가스 측정 방식에서는 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유에 채워진 가스의 흡수 스펙트럼을 우선 측정하고, 광섬유 브래그 격자를 파장 변조함으로써 얻어진 신호로부터 가스 농도에 대한 정보를 얻을 수 있다. 가스 측정 실험에서는 2m의 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유와 중심 파장이 1539.02nm인 광섬유 브래그 격자를 사용하였으며, 광섬유 브래그 격자의 반사파장을 1539.3nm에서 1539.6nm까지 2Hz의 주기로 가변하였다. 제안하는 가스센서는 2.5%, 5%의 아세틸렌가스를 선별적으로 잘 검출할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

We propose an optical gas sensor, which consists of a hollow core photonic bandgap fiber (HC-PBGF) and fiber Bragg grating (FBG), for the detection of acetylene gas. The gas detection scheme is uniquely characterized by modulating the Bragg wavelength of the fiber Bragg grating around a selected absorption line of gas filled in the photonic bandgap fiber. In the measurement, a 2m-long HC-PBGF and FBG with a Bragg wavelength of 1539.02nm were used. The FBG was modulated at 2Hz. We demonstrated that the optical fiber gas sensor was able to selectively measure the 2.5% and 5% of acetylene gases.

Keywords: 광학식 가스센서, 광섬유 브래그 격자, 파장 변조 기법, 포토닉 밴드갭 광섬유, 아세틸렌가스

Ⅰ. 서 론

산업이 발전함에 따라서 프로세스 관리[1], 환경[2~3], 안전관리[4~6] 등의 분야에서 누출된 각종 유독 가스 및 가연성 가스의 농도와 종류를 식별하는 것에 대한 중요성이 대두되고 있다. 특히 최근에는 생산, 운송, 저장, 사용, 폐기 등의 과정에서 각종 가스 누출에 의한 폭발, 질식, 중독 등의 사고가 빈번히 발생되고 있다. 이러한 다양한 형태의 사고를 미연에 방지하기 위해서는 각종 설비 및 시설로부터 누출되는 가스를 조기에 감지하고 대처해야만 한다. 이를 위해서는 보다 정밀하고 간단하면서도 가격이 저렴한 새로운 형태의 가스 검출방식에 대한 연구가 시급한 실정이다.

현재까지 개발된 광학식 가스검출 방식으로는 FT-IR 가스검출 방식[7]과 분광흡수법[8]을 이용한 가스검출 방식이 주류를 이루고 있다. 이러한 방식들은 기존의 전자소자 기반의 가스 검출방식에 비해서 감도와 안정성 측면에서 뛰어난 동작특성을 보여주고 있지만 소형화와

* 학생회원, ** 정회원, 성균관대학교 정보통신공학부
(School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

※ 이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-313-D00731)

접수일자: 2010년4월27일, 수정완료일: 2010년7월2일

저가격화를 달성하지 못했다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법 중 하나가 광섬유를 기반으로 하는 광학식 가스 검출방식이다. 광섬유를 이용한 가스 검출방식을 사용할 경우, 하나의 광원을 이용해 여러 곳의 가스를 동시에 검출해 낼 수 있는 분산 센서 시스템 구현이 가능하며, 기존에 구축되어 있는 광통신망과 연계하여 사용할 경우 원격가스검출 시스템 구현이 가능하다. 또한 저비용, 소형화가 가능하기 때문에 보다 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유(hollow core photonic bandgap fiber, HC-PBGF)와 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG)를 이용하여 전체 시스템이 광섬유로 이루어진 all-fiber 형태의 새로운 광학식 가스 검출 방식을 제안하고자 한다.

Ⅱ. Photonic Bandgap Fiber 가스 검출부

광자결정 광섬유는 기존의 일반 광섬유와는 달리 광섬유의 클래딩영역에 공기구멍들이 주기적으로 배열되어 있는 구조로써 일반적으로 두 가지로 구분된다. 첫 번째 광섬유는 순수 실리카 코어와 공기-실리카 구조의 클래딩으로 이루어져 있는 광자결정 광섬유로 굴절률 도파(index guiding)에 의해 빛이 코어를 도파한다. 두 번째 광섬유는 공기구멍 코어와 공기-실리카 구조의 클래딩이 있는 광자결정 광섬유로 포토닉 밴드갭 효과에 의해 빛이 코어를 도파한다.

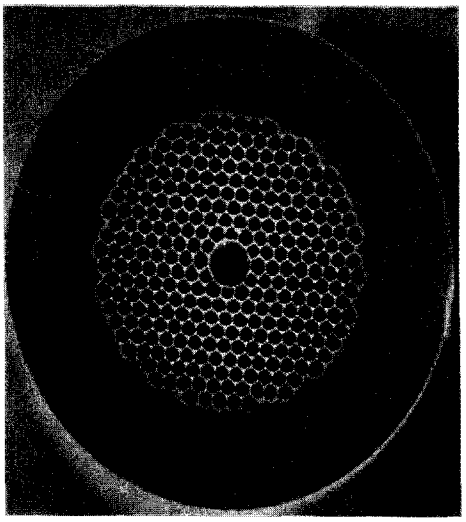


그림 1. HC-PBGF (HC-1550)의 절단면
Fig. 1. SEM image of HC-PBGF (HC-1550) cross section.

포토닉 밴드갭 광섬유는 공기구멍을 통해 빛을 도파시키기 때문에 도파영역의 매질에 의한 광손실이 거의 없고, 순수 실리카로 이루어져 있기 때문에 기존의 광섬유보다 온도와 같은 주변 환경 변화에 민감하지 않아 안정된 동작특성을 지닌다. 본 연구에서는 아세틸렌가스와 빛의 중첩이 큰 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유를 사용하였다. 그림 1은 실험에 사용된 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유의 절단면이다. 그림 1과 같이 광섬유 중앙의 구멍을 통해서 빛이 도파되기 때문에 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유 안에 특정 가스를 채우고 빛을 도파시키게 되면 빛의 특정 파장대역이 가스에 흡수되며, 이로써 가스를 검출할 수 있게 된다. 특정 가스와 빛의 흡수 정도는 아래 식(1)에서와 같이 Beer-Lambert 방정식으로 설명될 수 있다[9].

$$I_t = I_0 \exp(-\varepsilon L c) \tag{1}$$

위 식에서 I_0는 가스 분자를 통과하기 전의 빛의 세기, I_t는 가스 분자를 통과한 후의 빛의 세기, ε은 가스의 적외선 흡수 계수, L은 빛이 가스 분자를 통과한 거리, 그리고 c는 가스의 농도를 나타낸다.

본 연구에서는 특정 가스의 흡수 스펙트럼을 측정하기 위해서 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유를 이용해 그림 2와 같이 구성하였다. 2개의 단일모드광섬유(single mode fiber : SMF)사이에 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유를 접촉 결합(butt-coupling)한 후 진공펌프를 이용해 가스 샘플을 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유에 채웠다. 그리고 입력단에 1500대역 발광다이오드(light emitting diode, LED)를 연결하고 출력단에는 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 연결하여 가스 샘플의 흡수 스펙트럼을 측정하였다. 가스 샘플은 아세틸렌가스(acetylene, C_2H_2)를 사

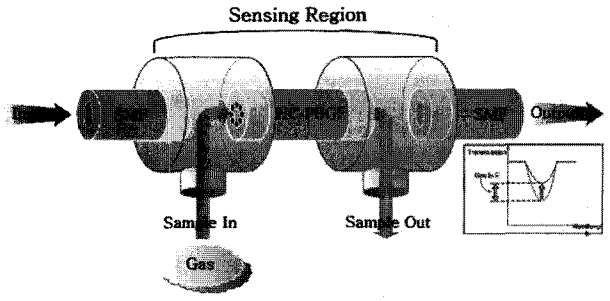


그림 2. Photonic bandgap fiber 가스 검출부 개념도
Fig. 2. Gas sensing part of photonic band gap fiber gas sensor.

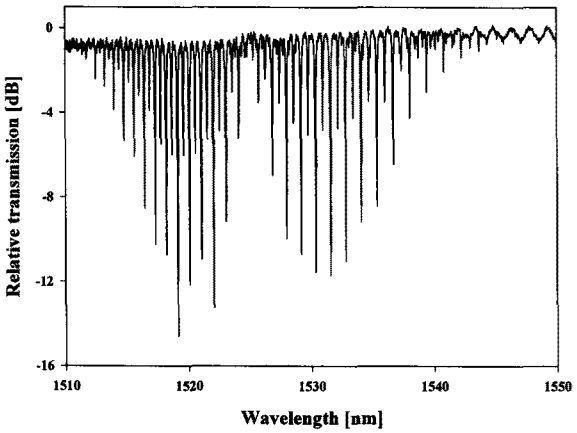


그림 3. 아세틸렌가스의 흡수 스펙트럼
Fig. 3. Absorption spectrum of acetylene gas

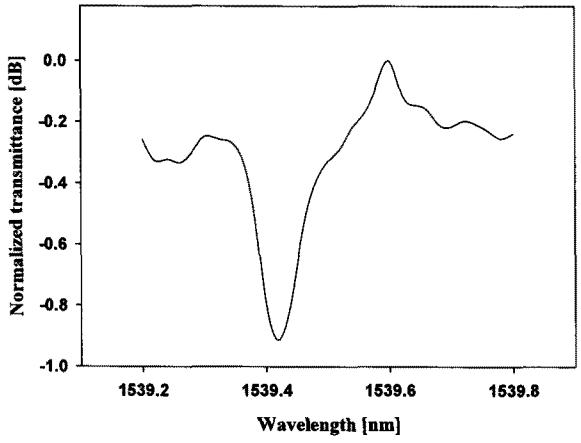


그림 4. 1539.42nm에 해당하는 아세틸렌가스의 흡수 스펙트럼
Fig. 4. Expanded spectrum of C_2H_2 near 1539.42nm.

용하였으며 아세틸렌가스는 광통신밴드의 C-밴드 영역인 1510nm~1550nm에 걸쳐 흡수 스펙트럼을 보인다. 그림 3은 2m의 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유에 5%의 아세틸렌가스를 진공펌프를 이용해 10분간 흡입하여 채우고 중심파장이 1550nm인 발광다이오드와 광스펙트럼 분석기(분해능 0.1nm)를 이용해 측정한 아세틸렌가스의 흡수 스펙트럼이다.

그림 4는 그림 3에서 보이는 전 파장 영역의 흡수스펙트럼 중에 실제 파장변조에 사용될 구간인 1539.3nm부터 1539.9nm까지 파장영역에서 아세틸렌가스의 흡수 스펙트럼을 확대한 그림이다.

III. Fiber Bragg Grating 파장 변조부

광섬유 브래그 격자는 Ge이 도핑된 광섬유의 코어에 엑시머 레이저(KrF or ArF excimer laser)를 이용하여 주기적인 유효 굴절률(n_{eff})의 변화를 주어 브래그 파장(Bragg wavelength, λ_B)의 빛을 반사시키는 소자이다. 광섬유 브래그 격자의 반사파장은 $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$이며, 여기서 n_{eff}는 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive Index)이고, Λ는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 주기이다. 현재까지 보고된 광섬유 격자 제작 방법 중, 가장 일반적인 방식으로는 자외선 빔과 위상마스크 (phase mask)를 이용해서 제작하는 방식이다. 이 방식은 동작파장이 248nm 대역인 KrF 엑시머 레이저에서 발진된 빔을 위상마스크를 통해 광섬유를 통해 조사하여 광섬유 코어 내에 주기적인 굴절률 변화를 야기하는 방법으로 재현성이 뛰어나고 단시간에 격자를 형성시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 UV빔을 이용해 격자를 형성시키기 위해서는 광감도(photosensitivity)가 향상된 특수한 광섬유나 광감도 향상을 위한 광섬유 수소처리가 반드시 필요하다. 그림 5는 본 실험에서 사용될 광섬유 브래그 격자의 제작 구성도이며, 파장변조에 사용될 중심파장이 1539.02nm인 광섬유 브래그 격자를 제작하였다.

앞에서 언급했듯이 광섬유 브래그 격자의 반사파장은 격자의 유효 굴절률과 격자의 주기에 비례한다. 따라서 광섬유 브래그 격자에 스트레인을 인가할 경우 광탄성(photoelastic) 효과에 의해서 유효 굴절률이 변하고, 유효 격자주기가 변하게 되어 스트레인 신호에 따라서 브래그 파장은 달라진다. 즉, 광섬유 브래그 격자에 스트레인을 인가했을 때 스트레인(ε)에 의한 중심파

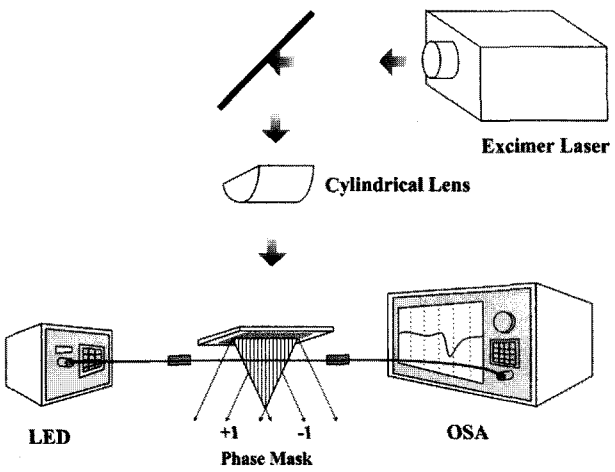


그림 5. 광섬유 브래그 격자 제작 구성도
Fig. 5. Experimental setup for the fabrication of fiber Bragg grating.

장의 변화는 다음 식으로 설명될 수 있다[10].

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1-p_e)\Delta\epsilon \quad (2)$$

여기에서 λ_B는 스트레인이 인가되지 않았을 때의 광섬유 브래그 격자의 중심파장이고, p_e는 광탄성 계수(effective photoelastic constant)를 말하며, $\Delta\epsilon$은 광섬유 격자에 인가된 스트레인의 변화량을 나타낸다. 일반적으로 Ge-silica의 광탄성 계수 p_e는 0.22이며, 광섬유 격자의 중심파장이 1540nm인 경우 1μ스트레인 당 1.21pm의 파장이 이동된다.

그림 6은 실제 브래그 광섬유 격자에 스트레인을 가하기 위한 MPC(multi position cylinder, E1100-MP-HC)를 이용한 스트레인 인가장치의 실제 사진이다. MPC의 실린더는 수평방향으로 직선 왕복운동이 가능하며, 이를 이용해 광섬유 브래그 격자를 고정한 상태에서 실린더를 왕복운동하게 되면 광섬유 브래그 격자에 스트레인이 전달되어 파장가변이 가능하게 된다. MPC는 컴퓨터를 이용하여 실린더의 이동거리와 왕복운동 속도를 정확하고 쉽게 조절할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그림 7은 스트레인 인가 시 제작된 광섬유 브래그 격자의 반사파장의 변화를 나타내는 반사스펙드럼이다. 측정된 데이터는 중심파장이 1539.42nm인 광섬유 브래그 격자에 MPC를 이용해 125μstrain씩 인가했을 때 광섬유 브래그 격자에서 반사된 빔의 세기이며 측정 시 광 스펙트럼 분석기의 분해능은 0.1nm 이었다.

그림 8은 스트레인 변화량에 따른 제작된 광섬유 브래그 격자의 중심 파장의 변화량을 이론값과 실험값을 비교한 그림이며 이 그래프를 통해서 광섬유 브래그 격자에 인가된 스트레인 양에 따라 파장이동이 선형적으로 일어나는 것을 알 수 있었으며, 이론값과 거의 일치하였다.

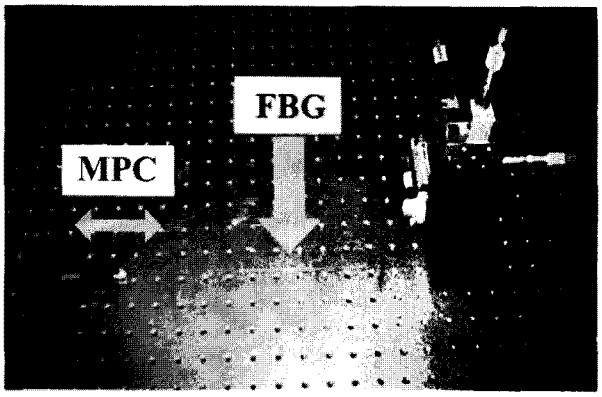


그림 6. MPC를 이용한 스트레인 인가 장치
Fig. 6. MPC system for applying strain signals to the fiber Bragg grating.

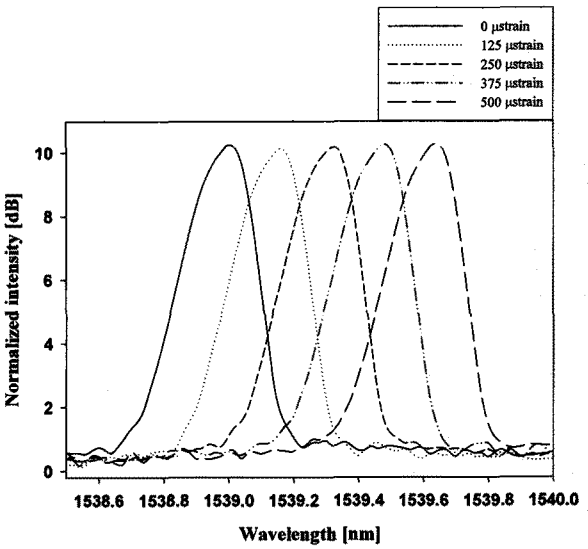


그림 7. 스트레인에 변화에 따른 광섬유 브래그 파장 변화량
Fig. 7. The Bragg wavelengths for different strains applied to the fiber Bragg grating.

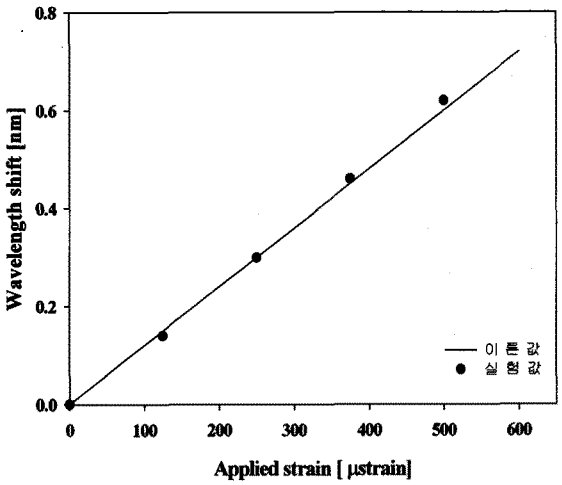


그림 8. 스트레인에 따른 광성유 브래그 파장 변화량
Fig. 8. Bragg wavelength shift versus applied strain. The Experimental data (•) are compared with the theoretical data (-).

Ⅳ. 가스 검출 시스템

앞에서 언급한 photonic bandgap fiber 가스 검출부와 fiber Bragg grating의 파장 변조부를 이용해서 그림 9에서와 같은 아세틸렌가스를 검출하기 위한 시스템을

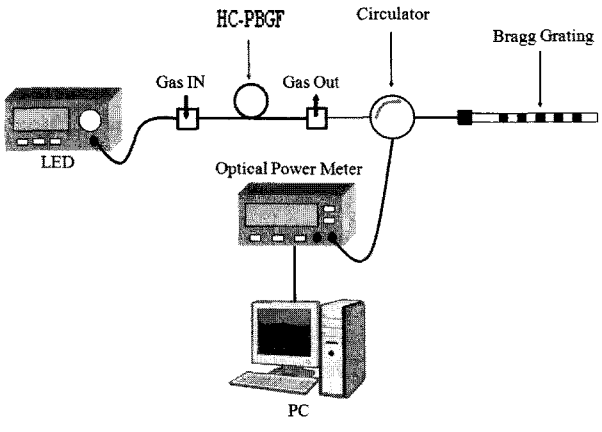


그림 9. 아세틸렌가스를 검출하기 위한 실험의 구성도
Fig. 9. Experimental setup for the detection of acetylene gas.

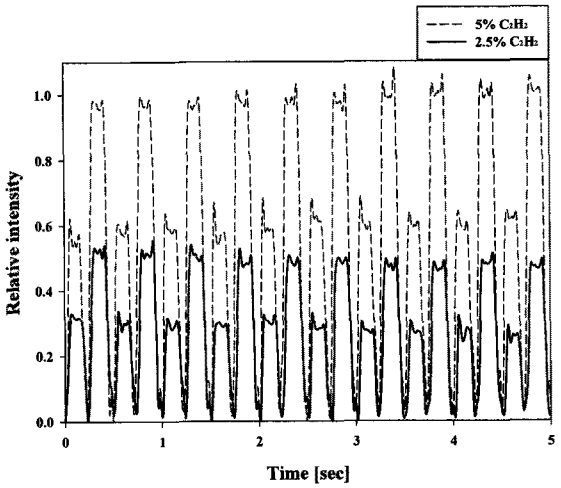


그림 10. 아세틸렌 광섬유 가스센서의 출력 신호
Fig. 10. The output signals of the acetylene optical fiber gas sensor.

구현하였다.

아세틸렌가스를 측정하기 위한 실험의 구성도는 그림 9에서와 같이 발광다이오드, 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유, 격자가 새겨진 단일모드 광섬유, 광섬유 격자의 주기를 변조하기 위한 MPC, 변조에 따라서 반사되어 나오는 빛의 양을 측정하는 광검출기(photo detector)와 광 파워미터(optical power meter), 신호처리를 위한 컴퓨터로 구성되었다. 측정할 가스는 2.5%, 5% 농도의 아세틸렌가스를 공급 하였으며, 질소가스와 아세틸렌가스를 일정한 비율로 혼합하여 대상가스를 희석하는 방법으로 농도를 변화시켜 측정하였다.

아세틸렌가스를 주입하기위한 광자결정 광섬유로는 2미터 길이의 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유를 사용하였으며, 아세틸렌가스의 주입은 진공 펌프를 사용하여 진행하였다. 광섬유 브래그 격자에서 반사되어 나오는 변조된 광신호를 측정하기 위하여 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유, 격자가 새겨진 단일모드 광섬유 그리고 광검출기 사이에 광순환기(circulator)를 연결하였고, 광원으로는 1500nm 대역의 발광다이오드를 사용하였다.

광섬유 브래그 파장의 가변 범위는 아세틸렌가스의 흡수라인 중 하나인 1539.42nm 근처의 흡수스펙트럼 라인을 포함하는 1539.3nm부터 1539.6nm까지의 파장 영역을 택하였다.

측정은 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유에 아세틸렌가스를 주입하고, 스트레인 인가장치를 이용해 광섬유 브래그 파장을 1539.3nm에서 1539.6nm까지 2Hz 가변시키면서 이를 통해 나오는 신호를 수집하였고, 파장 변조된 광섬유 브래그 격자에서 반사되는 광신호는 가스의 농도에 대한 정보를 포함하고 있기 때문에 이를 신호처리 하여 가스를 검출하였다. 변조 주파수는 장시간 변조 시 실리카로 이루어진 광섬유 브래그 격자에 무리를 주지 않고, 안정된 가스센서의 출력 신호를 도출해 내기 위해서 저주파수인 2Hz 선택하여 실험을 진행하였다.

그림 10은 광섬유 격자의 브래그 파장을 1539.3nm부터 1539.6nm까지 파장 변조 했을 때, 아세틸렌가스의 흡수 스펙트럼을 지나면서 반사되는 가스센서의 광신호를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 점선은 아세틸렌가스의 농도가 5% 일 때의 출력신호를 나타내며, 실선은 아세틸렌가스의 농도가 2.5% 일 때의 출력신호를 나타낸다. 즉 그림을 통해 가스의 아세틸렌가스의 농도가 증가함에 따라서 센서 출력신호의 진폭이 커지는 것을 알 수 있다.

그림 11은 광섬유 브래그 격자의 가변에 따른 센서 출력 신호의 주파수 성분이다. 광섬유 브래그 격자를 2Hz로 가변 하였을 때, 출력 신호의 주파수 성분이 2Hz와 4Hz를 가지는 이유는 광섬유 브래그 격자를 f 주파수로 변조하게 되면 실제 광섬유 브래그 격자의 반사파장은 1539.3nm부터 1539.9nm까지의 아세틸렌가스의 흡수라인을 2f의 주파수로 변조하기 때문이다. 이러한 이유 때문에 광섬유 브래그 격자의 변조 주파수 f의 두 배인 2f 주파수에 해당하는 신호, 즉 2차 조화(second harmonic) 신호가 출력되게 된다. 또한 그림 10과 그림 11을 통해 아세틸렌가스 농도가 2.5%에서

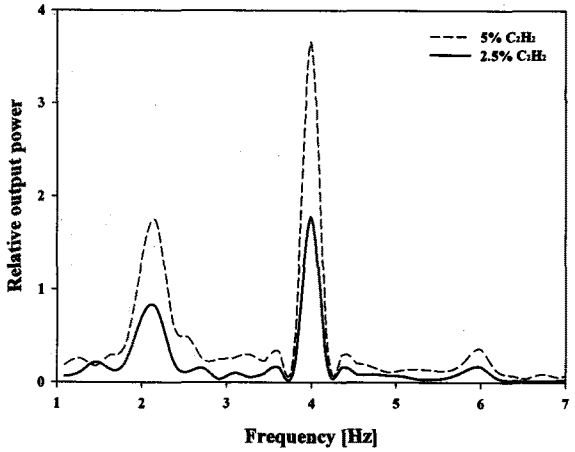


그림 11. 센서 출력신호의 주파수 성분
Fig. 11. The output power of the acetylene optical fiber gas sensor.

5%로 증가했을 때 센서 출력 신호가 증가하는 것을 알 수 있다. 이로써 가스 농도의 변화를 센서 출력 신호로 선별할 수 있다는 것을 실험적으로 확인하였다.

V. 결 론

할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유와 광섬유 브래그 격자를 이용하여 새로운 형태의 광학식 가스 검출 방식을 실험적으로 검증하였다. 아세틸렌가스가 채워진 2m 길이의 할로우 코어 포토닉 밴드갭 광섬유를 통과한 광신호를 측정하고, 제작된 중심파장이 1539.02nm인 광섬유 브래그 격자를 이용하여 아세틸렌가스의 흡수라인 중 하나인 1539.42nm 근처의 흡수스펙트럼 라인을 모두 포함하는 1539.3nm부터 1539.6nm까지의 영역을 2Hz 주기로 파장 변조하였다. 변조 후 출력된 신호의 크기를 통해 각각 2.5%, 5%농도의 아세틸렌가스를 선별적으로 검출하였다. 이로써 기존의 광학식 가스 검출 시스템의 단점인 저가격화 소형화가 가능한 전체 시스템이 광섬유로 이루어진 all-fiber 형태의 가스 검출 시스템을 구현하였다. 제안된 광섬유 형태의 광학식 가스센서는 할로우 코어 포토닉 광섬유의 길이, 광섬유 브래그 격자의 변조 주파수에 따라서 가스 센서의 감도 조절 및 분산 측정 시스템 구현이 가능하며, 현재 광섬유 길이 변화 및 다양한 농도에 따라서 실험 및 결과 분석을 진행 중에 있으며 차후에 발표할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] J. H. Visser and R. E. Soltis, "Automotive exhaust gas sensing systems," *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 50, pp. 1543-1550 (2001).

[2] S. Schilt, L. Thévenaz, M. Niklès, L. Emmenegger, and C. Hüglin, "Ammonia monitoring at trace level using photoacoustic spectroscopy in industrial and environmental applications," *Spectrochim. Acta Part A* 60, pp. 3259-3268 (2004).

[3] J. P. Besson, S. Schilt, E. Rochat, and L. Thévenaz, "Ammonia trace measurements at ppb level based on near-IR photoacoustic spectroscopy," *Appl. Phys. B* 85, pp. 323-328 (2006).

[4] G. Whitenett, G. Stewart, K. Atherton, B. Culshaw, and W. Johnstone, "Optical fibre instrumentation for environmental monitoring applications," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* 5, pp. S140-S145 (2003).

[5] H. K. Jones and J. Elgy, "Remote sensing to assess landfill gas migration," *Waste Manage. Res.* 12, pp. 327-337 (1994).

[6] U. Willer, D. Sheel, I. Kostjucenko, C. Bohling, W. Schade, and E. Faber, "Fiber-optic evanescent-field laser sensor for in-situ gas diagnostics," *Spectrochim. Acta Part A* 58, pp. 2427-2432 (2002).

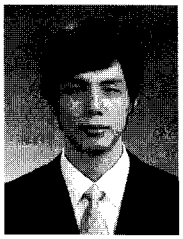
[7] J. M. Coronado, S. Kataoka, I. T. Tejedor and M. A. Anderson, "Dynamic phenomena during the photocatalytic oxidation of ethanol and acetone over nanocrystalline TiO2: simultaneous FTIR analysis of gas and surface species," *Journal of Catalysis,* 219, pp. 219-230 (2003).

[8] P. Werle, F. Slemr, K. Maurer, R. Kormann, R. Mucke, and B. Janker, "Near-and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis," *Optics and Lasers in Engineering,* 37, pp. 101-114 (2002).

[9] R. M. Mihalcea, D. S. Baer and R. K. Hanson, "Diode laser sensor for measurements of CO, CO_2 and CH_4 in combustion flows," *Applied Optics,* 36, pp. 8745-8752 (1997)

[10] A. T. Alavie, S. E. Karr, A. Othonos and R. M Measures, "A multiplexed bragg grating fiber laser system", *IEEE Photon. Technol. Lett.,* 5, pp. 1112-1114 (1993).

저 자 소 개



이 윤 규(학생회원)

2004년 인제대학교 광공학과 학사 졸업.

2010년 성균관대학교 정보통신공학부 석사 졸업.

2010년 성균관대학교 정보통신공학부 박사과정.

<주관심분야 : 광통신, 광전자, 광센서>

이 경 식(정회원)

1979년 성균관대학교 전자공학과 학사 졸업.

1978년 12월~1980년 8월 한국통신기술연구소 (현 한국전자통신연구원) 근무.

1982년 University of Colorado, Boulder 전기전자공학과 석사 졸업.

1985년 University of Colorado, Boulder 전기전자공학과 박사 졸업.

1986년 9월~1988년 7월 미국표준기술연구소 (NIST) 근무.

1988년 7월~1990년 2월 美 TACAN Corp 근무.

1998년 9월~1999년 8월 University of Rochester, The Institute of Optics 방문교수.

2005년 9월~2006년 8월 University of Arizona, Optical Science Center 방문교수.

1990년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수.

<주관심분야 : 광통신소자 및 시스템, 광섬유소자, 광섬유센서, Photonic Devices 등>