

광섬유 사낙간섭계에 삽입된 광섬유격자센서와 음향센서의 복조

(Demodulation of FBG and Acoustic Sensors Embedded in a Fiber-Optic Sagnac Loop)

김현진* · 이준호 · 송민호**

(Hyunjin Kim · June-Ho Lee · Minho Song)

Abstract

When the fiber Bragg gratings are embedded in a fiber-optic Sagnac loop for measuring temperature or strain, it is difficult to separate the Bragg wavelengths. The transmitted light is mixed with the reflected Bragg wavelengths in the photo-detector, working as noises. To suppress the noises, we placed the FBG sensors and a fiber-optic attenuator at asymmetric positions in the loop. With the arrangement the reflected light became much bigger than the transmitted light, enabling the separation of the reflected Bragg wavelengths with almost the same signal-to-noise ratio of the FBG sensors outside the loop.

Key Words : Fiber Bragg Gratings, Sagnac Loop, Interferometer, Attenuator, Acoustic Sensor, Temperature Sensor

1. 서 론

최근 우리나라의 전력사용량은 지속적으로 증가하고 있으며[1], 전력설비의 대용량화, 노후화에 따른 전력설비의 사고 또한 가파르게 증가하는 추세이다[2]. 전력설비중 변압기는 사고 시 파급효과가 매우 크고 구조적 특성으로 단순한 상태감시 기술의 적용이 어려우므로 다양한 진단기법이 활발하게 시도되어 왔다[2]. 변압기 사고의 가장 큰 원인 중 하나는 자연열화이다. 자연열화에 의한 사고는 발생하

기 전에 몇 가지 전조증상을 보이는데 평상시에 이러한 증상을 모니터링할 수 있다면 큰 사고에 대처할 수 있는 효율적인 유지보수가 가능할 것이다. 이러한 예방진단을 위하여 변압기의 외부에서 적외선 온도계나 열화상카메라 등으로 비정상적인 온도변화를 측정하거나 변압기 내부의 절연유에 용해된 가스를 분석하여 열화정도를 판단하는 유증가스분석법 등이 개발되었다. 이외에도 부분방전이나 진동 등을 측정하여 변압기 내부의 열화정도를 판단할 수 있는 근거로 삼을 수 있다. 그러나 외부 온도 측정은 변압기 내부의 상태를 정확하게 파악하기 어려우며 유증가스분석법은 설비가 운용중인 상태에서는 측정이 불가능하다[3-7].

운용중인 상태에서 보다 정확하게 변압기의 상태를 감시하기 위해서는 내부에 직접 센서를 적용하는 것

* 주저자 : 전북대학교 전자공학부 박사과정
** 교신저자 : 전북대학교 전자공학부 교수
Tel : 063-270-4285, Fax : 063-270-2394
E-mail : msong@chonbuk.ac.kr
접수일자 : 2011년 12월 1일
1차심사 : 2011년 12월 9일, 2차심사 : 2012년 1월 26일
심사완료 : 2012년 2월 2일

이 바람직하다. 그러나 기존의 전기적인 센서는 고전압, 대전류 환경에서 전자기 노이즈에 심하게 영향을 받을 뿐더러 절연성능저하 등의 심각한 문제를 유발할 수 있다. 반면에 절연체인 광섬유센서는 전자기파 간섭에 영향을 받지 않기 때문에 이러한 대용량 전력 설비의 상태감시 기술에 적용하기 유리하다.

이러한 장점을 이용하여 이전 연구에서 광섬유격자(fiber Bragg grating, FBG)를 이용한 온도 측정 시스템과[8] 광섬유 간섭계를 이용한 부분 방전 측정 시스템이 개발된 바 있다[9]. 본 논문에서는 두 가지 광섬유 센서를 결합하여 온도분포와 부분방전에 의한 신호를 동시에 모니터링 할 수 있는 광섬유센서 시스템을 제안한다.

단순하게 두 가지 광섬유센서를 결합하는 경우 신호 처리과정에서 두 가지 문제점이 발생한다. 첫째, 사낙 간섭계의 내부에 FBG가 있을 경우 반사파장과 투과 파장의 신호를 따로 분리하기 어렵다는 것이다. FBG에서 반사되는 파장과 투과 되는 파장이 서로 다른 방향으로 진행하여 간섭계 출력단에서 다시 합쳐지기 때문이다. 두 번째 문제점은 일반적으로 두 가지 광섬유센서에 적용하는 광원이 레이저와 광폭광원으로 특성이 서로 다르다는 것이다[8-9].

본 논문에서는 광섬유 사낙간섭계 내부에 FBG와 광섬유 감쇄기를 비대칭으로 배치하고 파장가변형 광섬유레이저를 광원으로 사용하여 이러한 문제점을 해결하였다.

2. 이론적 배경

2.1 광섬유격자(fiber Bragg grating)

FBG는 1980년대 말에 개발된 광섬유 소자로 온도나 스트레인 등의 물리량에 선형적으로 변화하는 파장출력을 낸다[10]. 이처럼 센서에 가해진 물리량이 반사파장으로 변조되기 때문에 출력단에서 파장의 변화를 복조하는 기술이 필요하다. 가장 쉽게 반사파장을 복조하는 방법은 FBG 센서에 광폭광원을 조사하고 반사파장을 광파장분석기(Optical Spectrum Analyzer)로 분석하는 방법이다. 그러나 광파장분석

기는 고가이며, 속도가 느리고 구조적인 안정성이 부족하므로 현장에서 활용하기 어렵다. 때문에 edge 필터, Fabry-Perot 필터, 간섭계, 포토디텍터 어레이와 회절격자를 이용하는 방법 등 광섬유격자 파장의 복조방법이 많이 연구되어 왔다[12-21].

본 논문에서는 Fabry-Perot 파장가변 필터를 이용하는 복조방식을 사용하였다. FBG의 반사파장을 투과파장을 주기적으로 스캔하는 파장가변필터에 통과시킨 후 광검출기(photo-detector)로 신호를 얻으면 파장정보를 시간축 상의 위치정보로 변환할 수 있다. 이때 시간축 상의 피크위치는 곧 FBG 반사파장으로 변환할 수 있으므로 다수의 FBG 신호를 하나의 파장가변필터로 복조할 수 있는 것이다. 파장가변필터를 이용하여 출력파장이 스캔되는 광섬유레이저를 구성한 후 광원으로 사용하면 동일한 복조효과를 얻는 것과 더불어 센서출력의 신호대잡음비를 향상시킬 수 있다[22].

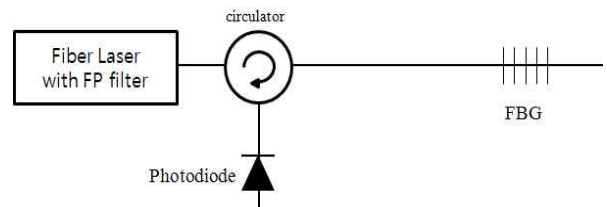


그림 1. 파장 가변 레이저를 이용한 FBG 복조시스템
Fig. 1. FBG demodulation system using wavelength tunable laser

2.2 Sagnac 간섭계

광학 간섭계는 광신호를 둘로 분리하고 일정한 경로를 거친 후 다시 결합시킨다. 이 때 분리된 광신호가 다시 결합될 때까지 겪는 광경로의 차이에 의해서 광검출기에서 발생하는 간섭신호의 크기 변화가 발생한다. 간섭계의 종류는 마하젠더(Mach-Zehnder), 마이켈슨(Michelson), 사낙(Sagnac), 페브리페로(Fabry-Perot) 등이 있으며 본 논문에서는 사낙 간섭계가 사용되었다. 다른 간섭계는 분리된 두 빛이 진행하는 경로가 서로 다르지만 사낙 간섭계의 경우에는 두 경로가 완전히 동일하다[22]. 따라서 외부영향이

없는 상황에서는 광경로차가 0이므로 항상 동일한 간섭신호를 발생한다. 그러나 간섭계가 회전하거나 빔가르개(beam splitter)로부터 비대칭한 위치에 진동, 스트레인, 온도변화 등의 외란이 가해지는 경우에는 시계방향, 반시계방향으로 진행되는 광신호의 사이에 위상 차이가 발생하고 간섭신호의 크기가 변화한다. 이러한 원리를 이용하여 사각 간섭계는 회전량, 진동, 음향신호, 그리고 전류 측정에 많이 활용되었다 [23-25].

그림 2는 광섬유 사각간섭계의 기본적인 형태이다. 레이저의 광신호출력은 결합기에서 50 : 50의 비율로 나누어지고 각각 시계 방향과 시계 반대 방향으로 루프를 진행하여 결합기를 통과한 후 간섭을 일으키고 광검출기에서 검출된다.

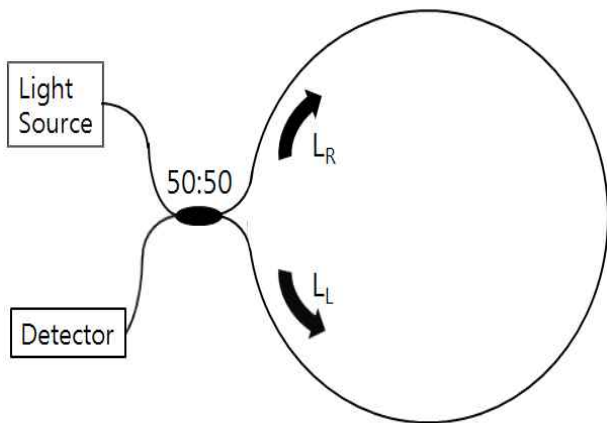


그림 2. 사각간섭계의 기본 형태
Fig. 2. Sagnac interferometer

3. 실험

3.1 파장가변 레이저

파장가변 레이저는 반도체광증폭기(SOA : semiconductor optical amplifier), Fabry-Perot 파장가변필터, 광차단기(isolator), 비대칭 결합기(asymmetric coupler)를 이용하여 제작하였다[22]. 기존의 상용화된 제품은 파장가변 속도나 가변파장 폭에서 많은 제약을 가지고 있지만 자체 제작한 파장가변 레이저를 이용하여 원하는 파장대역을 원하는 속도로 스캔할 수

있게 하였다. 구성된 파장가변 레이저의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 파장가변 레이저의 사양
Table 1. Specifications of wavelength tunable laser

Specification	Data
SOA 구동전류	250[mA]
파장가변범위	1510~1590[nm]
스캔속도	1[kHz]

그림 3은 파장가변 레이저의 파장을 변조하면서 광파장분석기를 이용하여 그 변화를 측정할 결과이다.

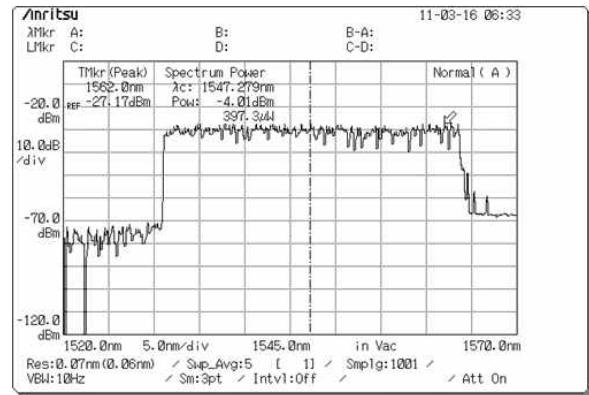


그림 3. 광파장분석기를 이용한 레이저의 출력측정
Fig. 3. Laser power measurement using optical spectrum analyzer

공진기 내부의 FP 필터를 1531~1558[nm]의 범위에서 램프파형(ramp waveform)으로 변조하였고 이때 오프셋과 전압의 최대치는 각각 4[V], 8[V]이다. 광파장분석기의 측정 속도가 느리므로 1[kHz]의 속도로 레이저를 빠르게 스캔하면 광폭광원과 유사한 스펙트럼을 얻는다.

레이저의 출력을 최적화하기 위하여 레이저 내부의 결합기에서 증폭단과 출력단 광량의 비율을 변경하며 최종 출력을 비교하였다. 필터의 투과 파장을 변화시킬 경우 파장에 따라 증폭률이 서로 다르기 때문에 출력이 불규칙하게 변동하여 정확한 비교가 힘들다. 이러한 출력변동에 따른 측정 오차를 줄이기 위해 필터

의 투과 파장을 고정시킨 상태에서 실험하였다. 그림 4, 5는 각각 측정을 위한 구성도와 결합기 비율에 따른 출력 파워의 변화를 나타낸 그래프이다.

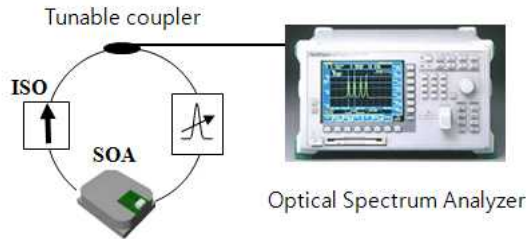


그림 4. 레이저 출력 측정을 위한 구성도
Fig. 4. Schematics for power measurement of laser

분리비율을 조정하며 얻은 그림 5의 결과로부터 결합기의 분리비율이 60 : 40일 때 레이저의 출력이 가장 큰 것을 알 수 있다

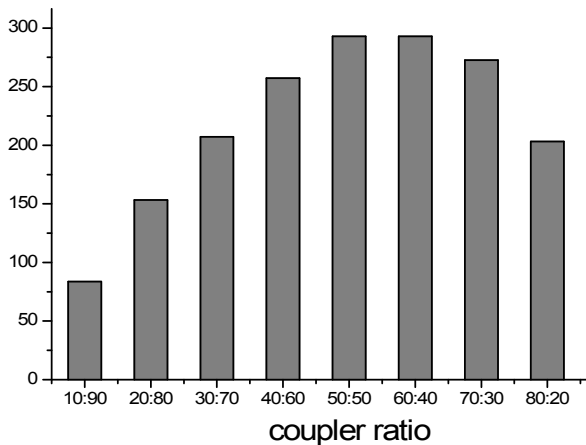


그림 5. 결합기 분리 비율에 따른 레이저의 출력 비교
Fig. 5. Power comparison according to coupler ratio

3.2 사낙 간섭계 내의 센서 신호 복조

FBG는 특정한 파장은 반사시키고 나머지 파장은 투과시킨다. 그림 6과 같이 FBG를 사낙간섭계의 내부에 설치할 경우 광검출기의 출력은 투과파장과 반사파장이 혼합되어 얻어진다. 때문에 그림 7 (a)와 같이 FBG 센서의 출력이 투과파장 신호에 가려져서 신호 처리를 할 수 없는 어려움이 발생한다. 이를 개선하기

위하여 간섭계의 내부에 광감쇄기(optical attenuator)를 설치하였다.

처음에는 사낙간섭계의 내부에 광검출기를 두어 레이저의 출력을 측정하고 이를 최종 출력에서 감산하여 FBG 신호를 복조하는 방법을 사용하였다. 그러나 그림 6과 같이 감쇄기를 사용하면 전체시스템의 구조가 단순해진다. 사낙간섭계의 형태를 띠고 있으나 직선상에 위치한 FBG의 반사파장을 받는 것과 유사한 출력을 얻을 수 있다.

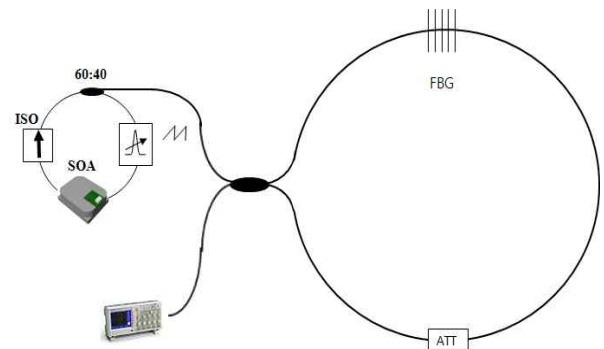


그림 6. 제안하는 시스템의 구조
Fig. 6. Structure of proposed system

그림 7은 사낙 간섭계를 통과한 후 광검출기에서 얻는 출력을 오실로스코프로 나타낸 것이다. 그림 7 (a)는 광감쇄기를 적용하지 않은 경우의 출력이다. FBG의 반사파장이 투과파장 신호에 묻혀 있다. (b)는 감쇄기를 이용하여 9[dB]의 감쇄를 준 경우의 출력이다. FBG 반사파장 신호가 구분된 것을 볼 수 있다. (c)는 비교를 위하여 사낙간섭계가 아닌 직선 라인에 FBG를 설치한 경우의 출력이다. 기존의 FBG 센서시스템은 주로 (c)형태의 출력을 얻는 경우가 많았다.

감쇄기를 이용한 감쇄의 정도에 따라 출력의 노이즈 레벨이 (a)와 (c)의 중간에서 결정될 것임을 알 수 있다.

그림 8은 제안한 시스템을 이용하여 FBG를 실험용 오븐에 넣고 30분마다 15[°C] 온도를 증가시키며 파장변화를 측정된 그래프이다. 사용한 오븐의 온도 설정 오차범위는 ±1[°C]이다. 오차범위 내에서 온도 변화에 따른 파장변화를 충실히 복조하고 있음을 알 수 있다.

광섬유 사나간섭계에 삽입된 광섬유격자센서와 음향센서의 복조

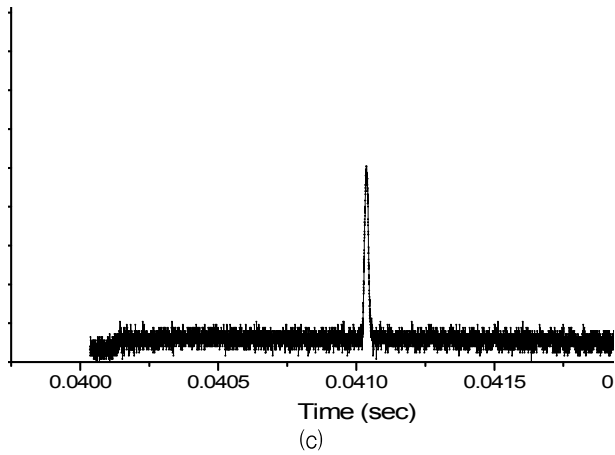
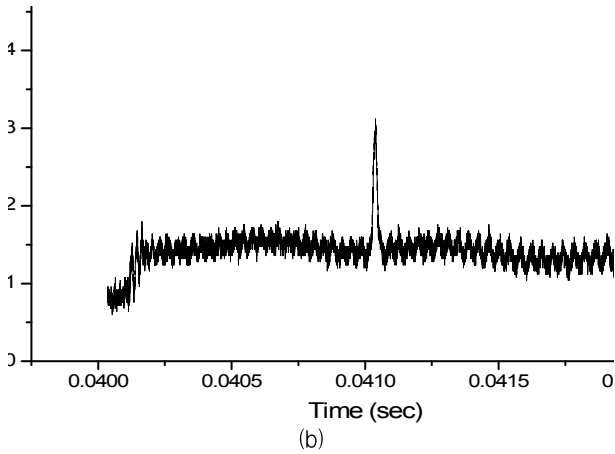
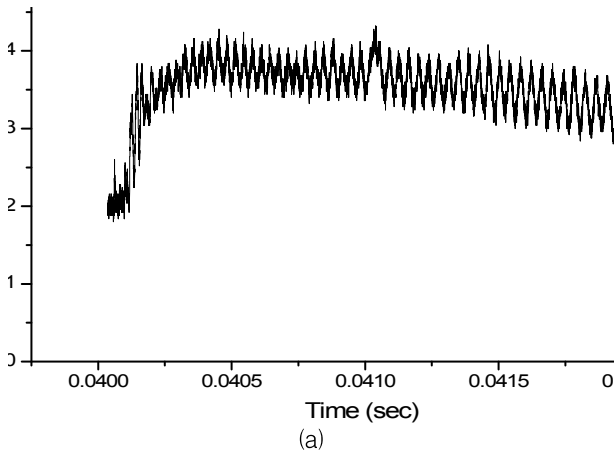


그림 7. 광감쇄에 따른 출력 변화(a : 감쇄가 전혀 없는 경우, b : 9[dB] 감쇄 한 경우, c : 사나간섭계가 아닌 직선라인 상일 경우)

Fig. 7. Output variation according to optical attenuation(a: no attenuation, b : 9[dB] attenuation, c : Outside of Sagnac loop)

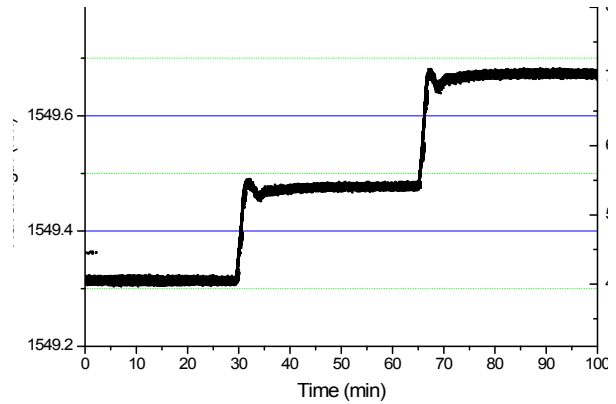


그림 8. 온도 변화에 따른 FBG 파장 복조
Fig. 8. FBG wavelength demodulation according to temperature variation

그림 9는 유조 내부에 압전소자와 함수발생기를 이용하여 35[Hz], 80[Hz] 2개의 진동신호를 방출시키고 제안한 시스템의 간섭계 내에 2개의 음향센서를 설치하여 측정된 결과이다. 45[Hz], 70[Hz]에 나타난 신호는 유조내 구조물에 의해 반사된 고조파 노이즈이다.

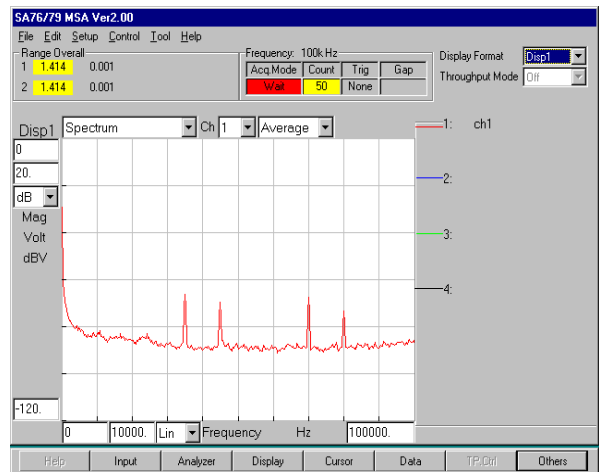


그림 9. 제안한 구조를 이용한 진동신호의 측정
Fig. 9. Vibration measurement using proposed system

그림 10은 제안한 시스템을 이용하여 간섭계 내부에 8개의 FBG를 이용하여 온도를 측정된 결과이다. (e)와 (h)에는 오븐에 삽입하여 동일한 온도 변화가 가해졌으며 나머지는 오븐 외부에 두어 온도변화를 가하지 않았다. 실험 결과에서 보듯 각자의 센서가 독립적

으로 온도를 측정할 수 있기 때문에 실제 변압기 측정에 응용될 경우 여러 부분을 동시에 측정 가능하다.

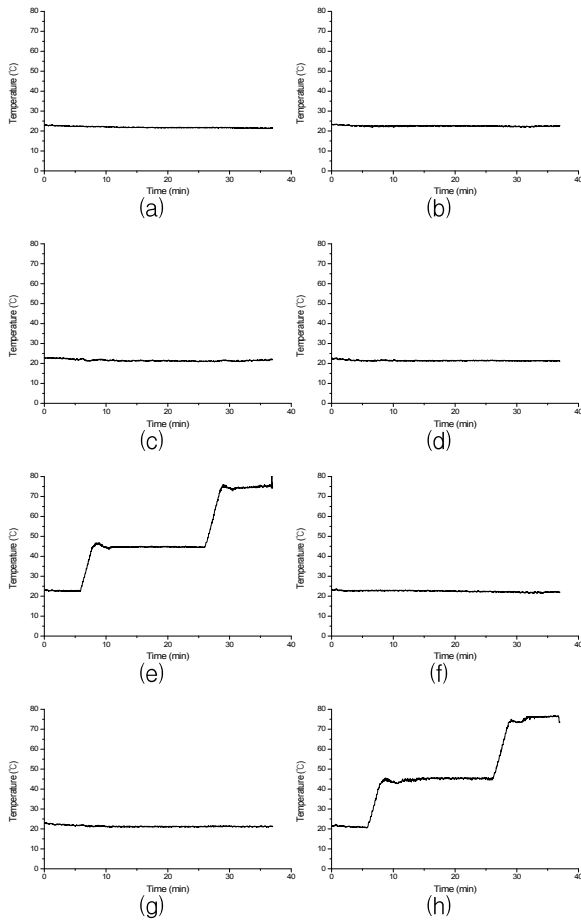


그림 10. 온도 변화에 따른 8개의 FBG 파장 복조
Fig. 10. Eight FBG wavelengths demodulation according to temperature variation

4. 결 론

본 논문에서는 온도와 부분방전에 의한 진동신호를 동시에 측정하기 위해 사낙간섭계 내부에 있는 FBG의 반사파장을 분리할 수 있는 방법을 제안하였다. SOA와 파장가변 필터를 이용하여 파장가변 레이저를 제작하고 비대칭 커플러를 이용하여 출력을 개선하였다. 사낙 간섭계 내부에 감쇄기를 설치하여 일반적인 FBG의 파장 복조와 유사한 출력을 얻을 수 있었다.

실험을 통하여 제안한 시스템이 FBG의 파장 변화를 충실하게 복조할 수 있음을 보였다. 또한 사낙간섭계를 이용한 음향센서의 스펙트럼을 분석하여 동시에 진동신호 측정이 가능함을 보였다. 제안한 시스템을 이용하여 변압기의 온도와 부분방전을 모니터링할 경우 설비의 효율적인 유지보수가 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No. 2010-0013118)

References

- [1] 전력통계정보시스템 (<http://epsis.kpx.or.kr/>)
- [2] 최상봉 “산업별 수용가 정전 비용 평가와 분석,” 에너지경제연구 vol 6, no 2, pp. 221-256, 2007.
- [3] 강대근, 윤상천, 정종만, “변압기 온도를 이용한 이상징후 판정방법에 대한 연구,” 대한전기학회 제41회 하계학술대회, pp. 312-313, 2010.
- [4] 전영갑, 선종호 “전력용 변압기의 열화진단 시험기술,” 대한전기학회, 전기의 세계, 제38권 제11호, pp. 21-33, 1989.
- [5] 임용배, 정종욱, 정진수, 고원식 “열화상을 이용한 몰드 변압기 권선표면 진단,” 대한전기학회, 2005 대한전기학회 전기설비전문위원회 추계학술대회 논문집, pp. 107-109, 2005.
- [6] 선종호, 김광화 “유증가스분석에 의한 변압기 이상진단법 기술동향,” 대한전기학회, 전기의 세계, 제52권 제12호, pp. 35-41, 2003.
- [7] 곽희로, 김재철, 황선주, 권태원, 윤용범 “변압기내 부분방전 탐지 및 위치검출,” 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비, 제6권 제4호, pp. 53-59, 1992.
- [8] 박형준, 이준호, 송민호, “전력설비 보호를 위한 분배형 광섬유 온도센서,” 조명·전기설비학회논문지, vol. 20, no. 5, pp. 64-71, 2006.
- [9] 이준호, 이철규, “광섬유 센서를 이용한 부분방전 측정연구,” 대한전기학회, 1998년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집 C, pp. 922-924, 1998.
- [10] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication,” Appl. Phys. Lett., 32(10), pp. 647-649, 1987.
- [11] Serge M. Melle, Kexing Liu, and Raymond M. Measures, “A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors,” Photon. Technol. Lett., Vol. 4, 5, May, 1992.
- [12] W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, “Fiber Bragg

grating sensors,” in Proc. SPIE, 1169, 98, 1989.

[13] W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn, “Bragg-grating temperature and strain sensors,” in Proc. OFS, 526, 1989.

[14] W. W. Morey, J. R. Dunphy, and G. Meltz, “Multiplexing fiber Bragg grating sensors,” in Proc. SPIE, 1586, 216, 1991.

[15] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, “High resolution fiber grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection,” Electron. Lett., 28, pp. 236-238, 1992.

[16] A. D. Kersey, “Interrogation and multiplexing techniques for fiber Bragg grating strain-sensors,” Proc. SPIE, 2071, pp. 30-48, 1993.

[17] D. A. Jackson, A. D. Kersey, M. Corke, and J. D. C. Jones, “Pseudo-heterodyne detection scheme for optical interferometers,” Electron. Lett., 18, pp. 1081-1082, 1982.

[18] R. J. Campbell and R. Kashyap, “Spectral profile and multiplexing of Bragg gratings in photosensitive fiber,” Opt. Lett., 16, pp. 898-900, 1991.

[19] Hyun wook Lee, Hyung-Jun Park, June-Ho Lee and Minho Song, “Accuracy improvement in peak positioning of spectrally distorted FBG sensors by Gaussian curve-fitting,” Appl. Opt., vol. 48, no. 12, pp 2205-2208, 2007.

[20] Hyung-Jun Park and Minho Song, “Linear FBG emperature Sensor Interrogation with Fabry-Perot ITU Multi-wavelength Reference,” Sensors, vol. 8, no. 10, pp 6769-6776, 2008.

[21] Hyung-Jun Park and Minho Song, “Fiber Grating Sensor Interrogation Using a Double-Pass Mach Zehnder Interferometer,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 22, pp 1833-1835, November 15, 2008.

[22] Hyunjin Kim and Minho Song, “Linear FBG interrogation with a wavelength-swept fiber laser and a volume phase grating spectrometer,” Proc. SPIE 7753, 77537Y, Ottawa, Canada, May. 2011.

[23] Anderson, R., Bilger, H.R., Stedman, G.E., “Sagnac effect: A century of Earth-rotated interferometers”. Am. J. Phys. 62 (11). pp. 975-985, 1994.

[24] Ruyong Wang, Yi Zheng, Aiping Yao., “Generalized Sagnac Effect”. Phys. Rev. Lett., pp. 93 (14), 2004.

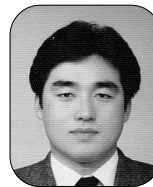
[25] 이종길, 이준호, 김상준, “광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 유중방전 신호검출,” 대한전기학회, 전기학회논문지 C, 제49C권 제11호. pp. 622-626, 2000.

◇ 저자소개 ◇



김현진(金炫震)

1980년 11월 8일생. 2007년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2009년 전북대학교 전자정보공학부 졸업(석사). 2009년 3월 전북대학교 전자공학부 박사과정 중.
E-mail : dldpavl@chonbuk.ac.kr



이준호(李峻昊)

1962년 9월 25일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업(박사). 1993~1994년 일본전력중앙연구소 초빙연구원. 현재 호서대학교 전기공학과 교수.
Tel : (041)540-5416
E-mail : leejh@office.hoseo.ac.kr



송민호(宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 1997년 서울대학교 전기공학과 졸업(박사). 2000년 9월 전북대학교 전자공학부 교수.
Tel : (063)270-4285
E-mail : msong@chonbuk.ac.kr