

열처리 공정을 이용한 regenerated FBG의 제작

서지희¹ · 이남권¹ · 이승환¹ · 김유미¹ · 유윤식^{1,2,+}

Fabrication of Regenerated Fiber Bragg Grating Using Thermal Annealing

Ji-Hee Seo¹, Nam-Kwon Lee¹, Seung-Hwan Lee¹, Yu-Mi Kim¹, and Yun-Sik Yu^{1,2,+}

Abstract

In this paper, we manufactured the regenerated FBG by the thermal annealing of seed FBG based on UV irradiation. The writing conditions of regenerated FBGs were investigated in four types of optical fiber. FBGs written in H₂-free fiber were erased and not regenerated during the thermal annealing. FBG written in H₂ loaded Boron co-doped fiber was erased at the temperature of about 580 °C and regenerated about 590 °C. However, the extinction of regenerated FBG started at the temperature over 900 °C and then FBG disappeared out. FBG written in H₂ loaded Ge high doped fiber was erased and regenerated around the temperature of 800 °C and maintained until the end of the thermal annealing. The reflection of the regenerated FBG was decreased about 12 dB and the center wavelength of the regenerated FBG was shifted about 0.7 nm compared with that of the seed FBG. The thermal characteristics of the regenerated FBG were analyzed by reheating from room temperature to 980 °C. As results, the regenerated FBG had survived without a decrease of reflection and the thermal sensitivity was 15 pm/°C.

Keywords : High temperature, Fiber Bragg grating, Regenerated grating, Fiber optic sensor

1. 서론

현재까지 온도, 변형률 등과 같은 물리량의 변화를 측정하기 위한 방법으로 전기식 센서가 많이 이용되어 왔다. 하지만 전기식 센서는 계측하고자 하는 물리량의 수가 많아질수록 센서와 계측장비를 연결하는 케이블의 수도 많아지고 설치 및 유지관리가 어렵다. 또한, 전기식 센서는 전자기와 간섭에 많은 영향을 받기 때문에 계측 신호의 왜곡이 발생할 가능성도 있다. 광섬유 센서는 광섬유 내에서 진행되는 빛의 파장, 세기 및 위상변화 등을 분석하여 변형률이나 온도 등과 같은 외부 물리량을 계측하는 센서로서, 내구성이 우수하여 대상물의 장기 계측이 가능하고, 전자기 간섭에 영향을 받지 않으므로 계측결과에 대한 신뢰도가 매우 우수하다. 이들 중 광섬유 브래그 격자(FBG: Fiber Bragg Grating)센서는 양산이 쉽고

파장 분할에 의한 센서 다중화가 용이하며, 정밀한 측정이 가능해 토목구조물이나, 선박, 항공기 등 다양한 분야에 응용되고 있으며, 풍력발전 및 원자력발전 등 에너지 분야에 적용하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다[1-7].

최근 열악한 환경에서의 센서 소자로서 FBG가 많은 관심을 받고 있다[7-9]. 고온, 고압, 화학 및 강한 EMI 등 열악한 환경에 노출되는 발전시설, 가스터빈, 연소실, 금속 및 유리 제조산업 등과 같은 분야에서 정확하고 신뢰성 있는 온도 측정은 안전뿐만 아니라 효율적 운용 및 제어를 위해 필수적이다. 하지만, 이러한 환경에서는 전기식 온도계 및 acoustic pyrometer 등과 같은 기존방식의 온도계를 적용하기는 쉽지 않다. FBG 온도 센서는 이와 같은 열악한 환경에서 효과적으로 적용 가능한 대안이 될 수 있다.

그러나, 자외선 조사 방식으로 제작된 일반적인 type I grating은 고온 환경에 노출되면 대역폭, 중심파장, 반사도 등의 특성이 변화하기 때문에 최대 사용온도가 대략 450 °C 정도로 알려져 있다 [10]. 따라서 고온에서도 안정적으로 동작할 수 있는 FBG에 대한 연구가 많이 진행되었다. 광섬유에 스트레인을 가한 상태에서 자외선을 조사하여 제작하는 type IIA grating은 700 °C 이상의 온도에서도 안정적인 것으로 보고되었으며[11], 매우 강한 자외선 레이저를 광섬유 코어에 조사하여 손상에 의한 광섬유 격자를 형성시키는 type II grating[12]의 경우 1000 °C 이상에서도 안정적이다. 하지만, type IIA grating은 제작과정에서 굴절률이 작아지는 특성을

¹부산IT융합부품연구소 (Convergence of IT Devices Institute Busan) Sanhak Bldg. 2F, Dong-Eui University, 176, Eomgwangno, Busanjin-gu, Busan, 614-714, Korea

²동의대학교 방사선학과(Department of Radiological Science, Dong-Eui University)

176, Eomgwangno, Busanjin-gu, Busan, 614-714, Korea

*Corresponding author: yuys@deu.ac.kr

(Received : Dec. 20, 2012, Revised : Feb. 12, 2013, Accepted : Feb. 19, 2013)

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.

나타내며, 이로 인해 격자의 반사도가 감소하게 된다. 또한, type II grating은 반사 스펙트럼이 단파장 쪽으로 비대칭 확장되는 특성을 나타내며, 넓은 스펙트럼 폭으로 인해서 센서 다중화가 용이하지 않는 단점이 있다. 이외에 플루오린(F)과 게르마늄이 첨가된 광섬유를 수소 처리한 후 FBG를 제작하고, 이를 고온 열처리하여 기존 격자의 소멸 이후 화학적 결합에 의한 새로운 격자가 재 생성되는 Chemical Composition Grating (CCG)이 발표되었다[13]. 이와 같은 CCG 또는 regenerated FBG는 seed 역할을 하는 type I grating에 비해 반사도는 감소하지만 seed FBG의 스펙트럼 형태는 유지하면서 고온에서도 안정적인 특성을 보여준다[14].

본 논문에서는 게르마늄/보론 첨가 광섬유(Ge/B co-doped fiber)와 게르마늄 첨가 광섬유(Ge high doped fiber)에 FBG를 제작한 후 고온에서 열처리하여 regenerated FBG의 생성과정을 확인하였으며, 제작된 regenerated FBG의 온도 특성을 측정하여 고온용 온도센서로 응용가능함을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 FBG의 기본원리

FBG는 1978년 K.O. Hill 그룹에 의해 처음 발견되었으며 1989년 G. Meltz, 1993년 Hill, Anderson 등에 의해 광섬유에 자외선을 조사하여 FBG를 제작하는 방법들이 발표되었다[15, 16]. 광섬유의 광민감성을 향상시킨 후 주기적인 간섭무늬 형태를 갖는 자외선을 조사하면 자외선에 노출된 곳만 굴절률이 상승하여 광섬유 코어의 굴절률 분포가 주기적으로 변조되어 FBG가 형성 된다. FBG는 아래의 식(1)과 같은 위상정합조건을 만족하는 특정 파장만 반사시키고, 나머지 파장은 투과시키는 협대역 파장 반사 필터의 특성을 나타내게 된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

여기서 λ_B 는 브래그 반사파장이고, n_{eff} 와 Λ 는 각각 광섬유 코어의 유효굴절률과 격자주기이다. 이러한 FBG에 온도나 스트레인 등을 가하게 되면 광섬유 코어의 유효굴절률이나 격자의 주기가 변화하게 되고, 결국 반사파장이 이동하게 된다. 따라서 FBG센서는 반사파장의 이동을 계측하여 FBG에 가해진 물리량을 감지하게 된다.

2.2 Seed FBG 제작

Regenerated FBG 제작을 위해 먼저 seed FBG를 제작하였다. Seed FBG는 게르마늄/보론 첨가 광섬유와 게르마늄 첨가 광섬유에 제작되었다. 두 종류의 광섬유 모두 첨가물질에 의해 광민감성이 대폭 향상되어 수소처리 없이 격자가 잘 형성되었지만, 수소처리 효

과에 따른 regenerated FBG 제작 특성을 파악하기 위하여 수소처리 유무에 따라 각각 2종류의 FBG를 제작하였다. 따라서 광섬유 종류 및 수소처리유무에 따라 총 4가지의 seed FBG를 제작하였다. Fig. 1은 seed FBG를 제작하기 위한 제작시스템 및 수소처리 장치이다. 248 nm 파장을 갖는 KrF 엑시머 레이저와 위상마스크를 사용하여 FBG를 제작하였으며, 수소처리는 상온, 100 bar에서 3일 동안 수행하였다.

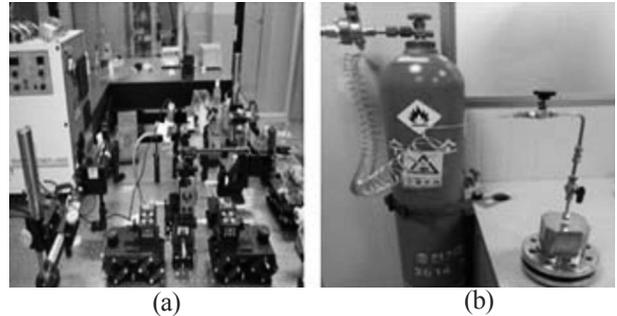


Fig. 1. (a) FBG fabrication system and (b) hydrogen loading setup.

2.3 Regenerated FBG 제작을 위한 열처리

Regenerated FBG 제작을 위한 고온 열처리를 위해 광섬유 열처리에 적합한 튜브형 전기로를 사용하였다. FBG가 형성된 광섬유 중 전기로 내부에 삽입될 부분의 코팅을 제거하여 광섬유 코팅물질이 고온에 노출되어 발생할 수 있는 영향을 방지하였다. 또한, 광섬유를 튜브에 삽입한 후 광섬유 홀더를 이용하여 고온에 노출되는 광섬유와 튜브가 접촉하지 않도록 고정한 후 열처리를 진행하였다. 광대역 광원과 광 스펙트럼 분석기를 사용하여 열처리공정이 진행되는 동안 실시간으로 FBG의 반사도 및 스펙트럼 특성을 분석하였다. Fig. 2는 regenerated FBG 제작을 위한 실험 셋업 구성도 및 실제 사진이다.

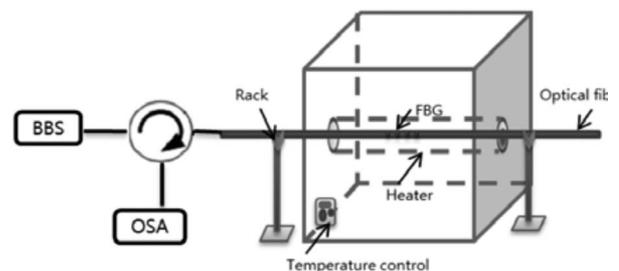


Fig. 2. Experimental setup for thermal annealing of FBG.

Fig. 2와 같이 실험 셋업을 구성한 후 상온에서부터 전기로의 최대 제어가능 온도인 980℃까지 온도를 상승시킨 후 다시 온도를 상온까지 하강시켜 열처리 공정을 마무리 하였다. 상온에서 500℃까

지 연속적으로 온도를 상승시켰으며, 500°C 이상에서는 15분에 100°C씩 온도 상승 후 온도 안정화를 위해 15분의 유지시간을 두었다.

제작 완료된 regenerated FBG의 온도 특성을 측정하기 위하여 다시 재 가열 실험을 진행하였다. 재 가열 시에는 온도 안정화를 위한 유지시간 없이 상온부터 980°C까지 온도를 상승시켰으며, 광 스펙트럼분석기를 이용하여 온도에 대한 regenerated FBG의 스펙트럼 특성을 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 수소처리 하지 않은 FBG의 격자소멸

먼저 수소처리 하지 않은 게르마늄/보론 첨가 광섬유와 게르마늄 첨가 광섬유에 제작된 FBG를 이용하여 980°C까지 열처리 공정을 실행하였다. 그 결과 두 종류의 광섬유 모두 FBG가 소멸된 이후 재생성되지 않았다. Fig. 3은 수소처리 하지 않은 게르마늄/보론 첨가 광섬유에 제작된 FBG를 열처리 하였을 때 FBG의 소멸 과정을 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 열처리 온도에 따른 FBG 반사피크 값의 변화를 나타낸 것이다. 그래프에서 실선으로 표시된 부분은 시간에 따른 열처리 공정 온도변화이며, 점선은 FBG의 반사피크 값을 나타낸 것이다. 열처리 온도가 200°C를 초과하여 500°C로 상승하는

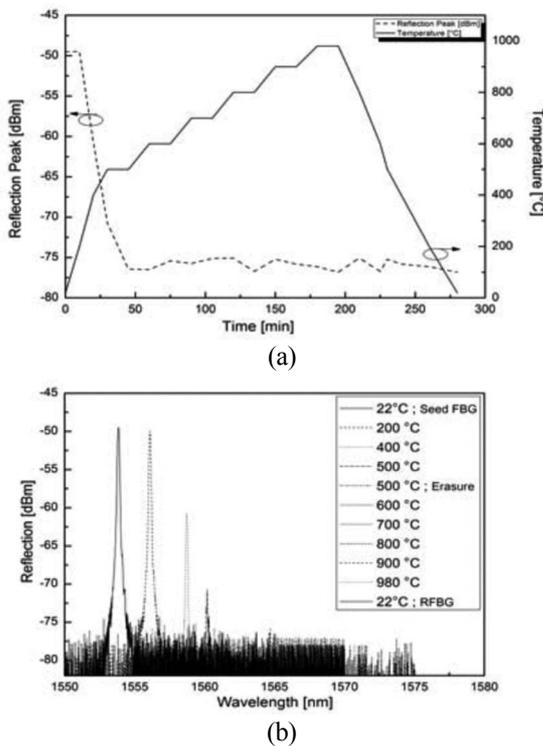


Fig. 3. (a) Reflection peak values and (b) reflection spectra of FBG written in H₂ free Boron co-doped fiber during the thermal annealing.

동안 반사광의 세기가 감소하여 500°C에서 온도를 유지하는 동안 반사광이 완전히 사라져, 이후 열처리 온도가 더욱 상승되어도 더 이상 반사광이 나타나지 않았다. (b)는 열처리 공정 중 측정된 반사 스펙트럼이다. 열처리 온도가 상승함에 따라 반사광의 중심파장이 장파장으로 이동하면서 동시에 반사광의 세기도 감소하며, 결국 500°C 이상의 온도에서는 더 이상 반사스펙트럼이 측정되지 않았다. Fig. 4는 수소처리 하지 않은 게르마늄 첨가 광섬유에 제작된 FBG를 열처리 하였을 때의 측정 결과이다. 게르마늄/보론 첨가 광섬유에서와 유사하게 열처리 온도가 상승함에 따라 서서히 반사광이 감소하다가 800°C에서 900°C로 온도가 상승하는 동안 급격하게 감소하여 880°C 부근에서 완전히 소멸하였다.

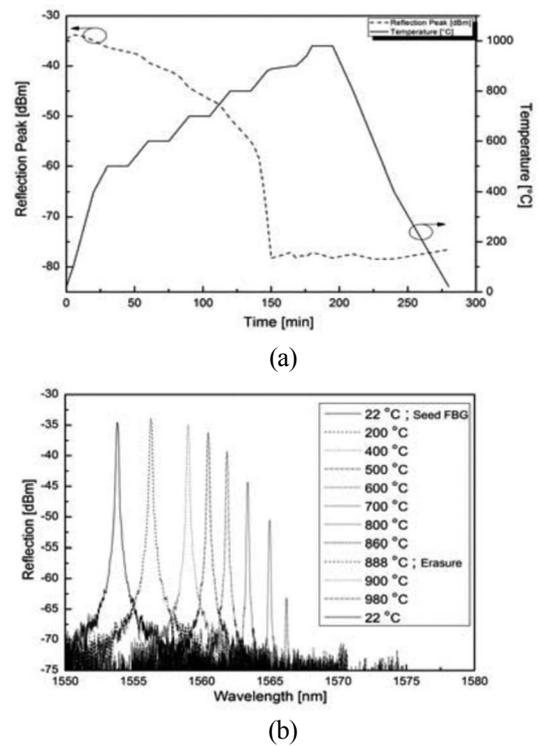


Fig. 4. (a) Reflection peak values and (b) reflection spectra of FBG written in H₂ free Ge high doped fiber during the thermal annealing.

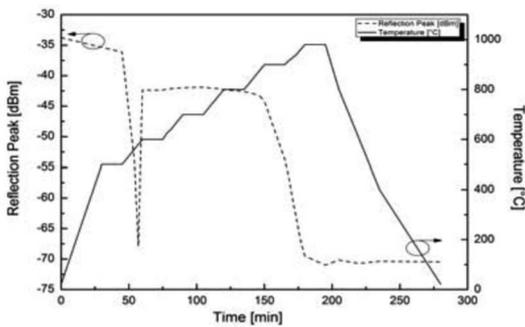
3.2 수소 처리한 FBG의 격자 재생성

수소 처리한 게르마늄/보론 첨가 광섬유에 seed FBG를 제작한 후 열처리 공정을 수행하였다. Fig. 5는 열처리 과정 중의 FBG 반사피크값과 스펙트럼 측정결과이다. 온도가 상승함에 따라 반사피크 값이 서서히 감소하다 500°C에서 600°C도 상승하는 구간에서 급격하게 감소한 후 다시 증가하고 있다. Fig. 6은 온도가 500°C에서 600°C로 상승하는 동안 FBG의 반사스펙트럼 변화를 보여주고 있다. 580°C에서 격자가 소멸되어 반사가 사라졌으나 590°C에서 다시 격자가 재 생성되고 있다. 이때 재 생성된 FBG의 반사피크 값

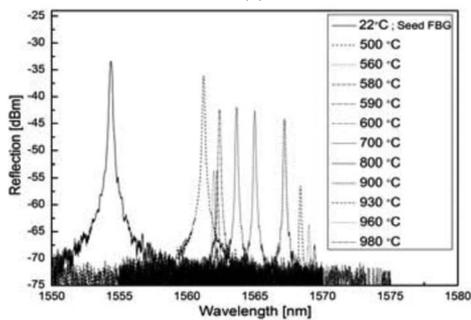
은 seed FBG에 비해 대략 9 dB 정도 감소하였다. 이후 800℃까지 반사피크 값이 잘 유지되었으나 900℃에서 반사도가 급격히 감소하여 결국 재 소멸되었다.

Fig. 7은 수소 처리한 게르마늄 첨가 광섬유에 제작된 FBG의 열처리 시 측정된 결과이다. 게르마늄/보론 첨가 광섬유에서와는 달리 780℃ 부근에서부터 급격히 반사도가 감소하였으며, 800℃를 유지하는 구간에서 소멸 및 재생현상이 발생하였다. Fig. 8은 800℃를 유지하는 구간에서 격자가 소멸되었다가 재 생성되는 과정을 보여주고 있다. 재 생성된 FBG는 이후 980℃까지 재 소멸되지 않았으며, 다시 온도를 상온까지 하강시켜 열처리를 종료한 시점까지 잘 유지되었다. 제작된 regenerated FBG는 seed FBG에 비해 반사도는 대략 12 dB 정도 감소하였고, 반사파장은 0.7 nm 정도 장파장으로 이동한 결과를 보였다. 이러한 격자의 재생현상은 아직 이론적으로 명확하게 밝혀지지 않았지만 수소 처리된 광섬유에 자외선을 조사하여 seed FBG를 제작할 때 생성된 수산화기와 광섬유 내에 첨가된 dopant들 간의 상호작용에 의한 것으로 추정된다.

결국 수소 처리된 게르마늄/보론 첨가 광섬유의 경우 격자가 재생성되기는 하지만 800℃까지만 안정적으로 유지되며 그 이상의 고온에서는 다시 재 소멸되므로 열처리 온도 조절을 통해 regenerated FBG로 제작되더라도 800℃이하에서 응용 가능할 것으로 예상된다. 또한, 수소 처리된 게르마늄 첨가 광섬유에서는 격자 재 생성 이후 전기로의 제어 한계인 980℃까지 격자가 유지되었으며 1000℃ 이상의 고온 환경에서도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Reflection peak values and (b) reflection spectra of FBG written in H₂ loaded Boron co-doped fiber during the thermal annealing.

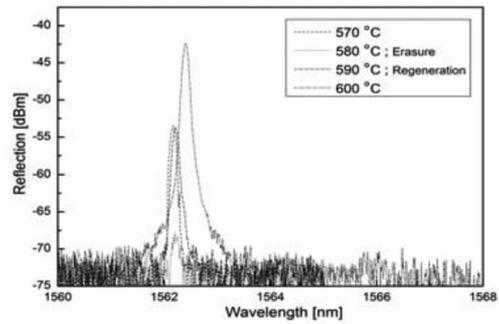
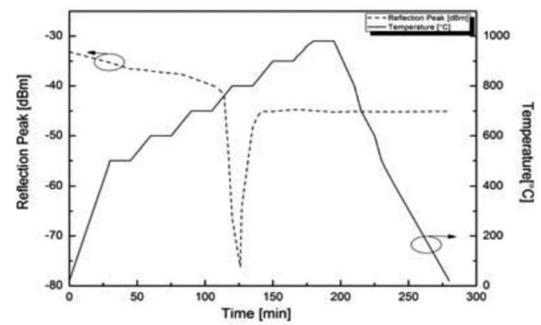
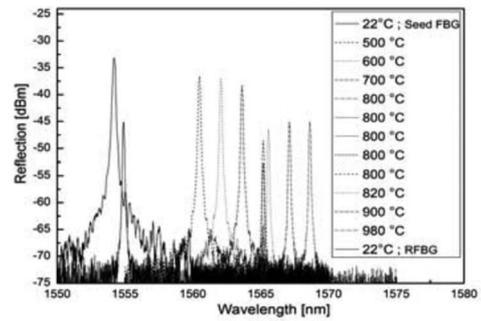


Fig. 6. Grating regeneration of FBG written in H₂ loaded Ge high doped fiber from 560°C to 600°C.



(a)



(b)

Fig. 7. (a) Reflection peak values and (b) reflection spectra of FBG written in H₂ loaded Ge high doped fiber during the thermal annealing.

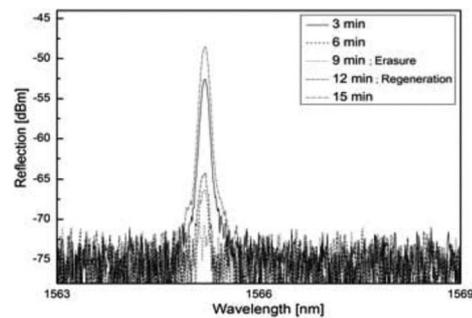


Fig. 8. Grating regeneration of FBG written in H₂ loaded Ge high doped fiber at 800°C.

3.3 Regenerated FBG의 온도 특성

게르마늄 첨가 광섬유에 제작된 regenerated FBG를 상온부터 980℃까지 재 가열하여 온도에 따른 특성을 측정하였다. Fig. 9는 온도상승에 따른 regenerated FBG의 반사스펙트럼을 측정한 결과이다. 온도가 상승함에 따라 반사파장이 장파장으로 이동하고 있으며, 이 때 반사도의 감소 없이 격자가 잘 유지되고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 상온부터 980℃까지 온도에 따른 regenerated FBG의 반사파장 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 온도가 상승함에 따라 반사파장이 장파장 쪽으로 선형적으로 이동하고 있으며, 이 때 대략 15 pm/℃의 감도를 나타내었다.

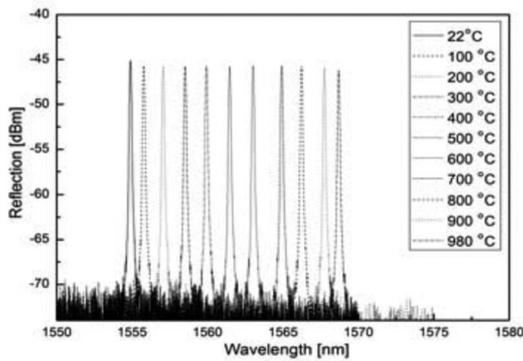


Fig. 9. Reflection spectra of regenerated FBG from room temperature to 980℃.

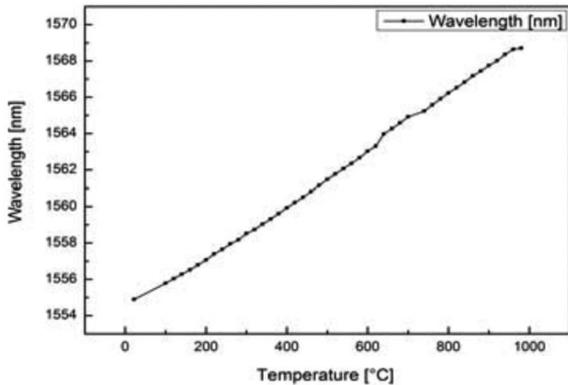


Fig. 10. Bragg wavelength versus temperature for regenerated FBG from room temperature to 980℃.

4. 결론

본 연구에서는 자외선 조사방식으로 제작된 FBG를 고온 열처리하여 고온에서도 안정적으로 유지되는 regenerated FBG를 제작하였다. 광 민감성 광섬유인 게르마늄/보론 첨가 광섬유와 게르마늄 첨가 광섬유에 수소처리 유무에 따라 총 4종의 seed FBG를 제

작한 후 튜브형 전기로에서 980℃까지 열처리 공정을 수행하여 regenerated FBG의 생성과정을 확인하였다. 실험 결과 수소처리 없이 제작된 FBG는 소멸되어 재생되지 않았다. 수소 처리한 게르마늄/보론 첨가 광섬유의 경우 온도가 500℃에서 600℃로 상승하는 구간에서 격자가 소멸되었다가 재 생성되었으나 900℃ 이상의 온도에서 다시 소멸하였다. 수소 처리한 게르마늄 첨가 광섬유의 경우, 800℃에서 온도를 유지하는 구간에서 격자가 소멸한 이후 바로 재 생성되어 980℃까지 재 소멸되지 않았으며, 다시 온도를 상온까지 하강시켜 열처리를 종료한 시점까지 잘 유지되었다. 수소 처리한 게르마늄 첨가 광섬유에 제작된 regenerated FBG를 상온부터 980℃까지 재 가열하여 온도특성을 측정하였다. 온도가 상승하더라도 반사도 감소 없이 격자가 잘 유지되었으며 온도가 상승함에 따라 반사파장이 장파장 쪽으로 선형적으로 이동하였다. 이때 온도에 대한 감도는 대략 15 pm/℃ 이었다.

REFERENCES

- [1] R. J. Sun, Z. Sun, D. H. Dan, and L. M. Sun, "An integrated FBG sensing system for bridge health monitoring", *Proc. of SPIE*, Vol. 6174, 61742Q1, 2006.
- [2] P. Biswas, S. Bandyopadhyay, K. Kesavan, S. Parivallal, B. A. Sundaram, K. Ravisankar, and K. Dasgupta, "Investigation on packages of fiber Bragg grating for use as embeddable strain sensor in concrete structure", *Sensor Actuat. A-Phys.*, Vol. 157, pp. 77-83, 2010.
- [3] W. L. Schulz, E. Udd, J. M. Seim, and G. E. McGill, "Advanced fiber grating strain sensor systems for bridges, structures, and highway", *Proc. SPIE.*, Vol. 3325, pp. 212-221, 1998.
- [4] G. Wang, K. Pran, G. Sagvolden, G. B. Havsgard, A. E. Jensen, G. A. Johnson, and S. T. Vohra, "Ship hull structure monitoring using fibre optic sensors", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 10, p. 472, 2001.
- [5] A. Cusano, P. Capoluongo, S. Campopiano, A. Cutolo, M. Giordano, F. Felli, A. Paolozzi, and M. Caponero, "Experimental modal analysis of an aircraft model wing by embedded fiber Bragg grating sensors", *IEEE Sens. J.*, Vol. 6, pp. 67-77, 2006.
- [6] K. Schroeder, W. Ecke, J. Apitz, E. Lembke, and G. Lenschow, "A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 1167-1172,

- 2006.
- [7] A. F. Fernandez, B. Brichard, P. Borgermans, F. Berghmans, M. Decreton, P. Megret, M. Blondel, and A. Delchambre, "Fibre Bragg grating temperature sensors for harsh nuclear environments", *Conf. of OFS*, Vol. 1, pp. 63-66, 2002.
- [8] W. Ecke, I. Latka, T. Habisreuther, and H. Lingertat, "Fiber optic grating sensors for structural health monitoring at cryogenic temperatures", *Proc. of SPIE*, Vol. 6530, pp. 1-8, 2007.
- [9] H. Bartelt, K. Schuster, S. Unger, C. Chojetzki, M. Rothhardt, and I. Latka, "Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures", *Appl. Optics*, Vol. 46, pp. 3417-3424, 2007.
- [10] T. Erdogan, V. Mizrahi, P. J. Lemaire, and D. Monroe, "Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings", *J. Appl. Phys.*, Vol. 76, pp. 73-80, 1994.
- [11] N. Groothoff and J. Canning, "Enhanced type IIA gratings for high-temperature operation", *Opt. Lett.*, Vol. 29, pp. 2360-2362, 2004.
- [12] J. L. Archambault, L. Reekie, and P. S. J. Russell, "High reflectivity and narrow bandwidth fibre gratings written by single excimer pulse", *Electron. Lett.*, Vol. 29, pp. 28-29, 1993.
- [13] M. Fokine, "Underlying mechanisms, applications, and limitations of chemical composition gratings in silica based fibers", *J. Non-Crystal. Solids*, Vol. 349, pp. 98-104, 2004.
- [14] J. H. Seo, N. K. Lee, S. H. Lee, Y. M. Kim, and Y. S. Yu, "The study of regenerated fiber Bragg grating for high temperature application", *Proceeding of the Korean Sensors Society*, Vol. 23, p. 145, 2012.
- [15] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", *Opt. Lett.*, Vol. 14, pp. 823-825, 1989.
- [16] Hill, K.O.; Malo, B.; Bilodeau, F.; Johnson, D. C.; Albert, J. "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 62, pp. 1035-1037, 1993.