

광섬유 FBG 센서를 이용한 탄성과 검출

Elastic Wave Detection Using Fiber Optic FBG Sensor

서대철*[†], 권일범*, 윤동진*, 이승석*, 이정을**

Dae-Cheol Seo*[†], Il-Bum Kwon*, Dong-Jin Yoon*, Seung-Suk Lee* and Jung-Ryul Lee*

초 록 음향방출법은 압력용기 구조에서 존재하는 결함이나 누출을 탐지하거나 모니터링 하는데 유용한 도구로 부상하였다. 본 연구에서는 브레그 격자에 근거한 음향방출센서 시스템이 개발되었다. 다양한 길이의 센싱부를 포함하는 다양한 형태의 광섬유 브레그 격자센서가 제작되었고 PZT 펄서와 연필심 파괴를 이용하여 시험되었다. 두 가지 형태의 센서부착법이 사용되었다. 첫째는 광섬유 브레그 격자센서가 접착제를 이용하여 표면에 완전히 부착되는 방법이고 둘째는 센서의 한쪽 부분만 표면에 부분적으로 고정하고 다른 쪽은 외팔보와 같이 작동하도록 하는 방법이다. 이렇게 함으로써 센싱부의 길이에 비례하는 고유진동수를 갖는 광섬유 브레그 격자센서를 구성할 수 있다. 본 연구에 사용된 센서 시스템의 최종 목적은 원자력발전소 상부 관통관의 균열이나 누출을 탐지하는 온라인 모니터링 시스템에 사용하는 것이다.

주요용어: 음향방출, 광섬유센서, FBG 센서, 탄성과

Abstract Acoustic emission(AE) has emerged as a powerful nondestructive tool to detect or monitor preexisting defects and leaks in the vessel structures. A Bragg grating based acoustic emission sensor system is developed. Various type of fiber Bragg grating sensor including the variable length of sensing part was fabricated and prototype sensor system was tested by using PZT pulser and pencil lead break sources. Two types of sensor attachment were used. First, the fiber Bragg grating sensor was attached fully to the surface using bonding agent. Second one is that one part of fiber was attached to the surface partly by bonding and the other part of fiber will be act as a cantilever. That is, the resonant frequency of the fiber Bragg grating sensor will depend on the length of sensing part. The final goal of the sensor system is to provide on-line monitoring of cracks or leaks in reactor vessel head penetration of nuclear power plants.

Keywords: Acoustic Emission, Fiber Optic Sensor, FBG Sensor, Elastic Wave

1. 서 론

구조물에서의 균열 진전 혹은 누출에 따른 탄성과 음향방출(acoustic emission)을 측정하게 되면 구조물에서의 이상 징후를 사전에 감지할 수 있게 되며, 이는 조기 감지의 기능으로서 큰 사고를 미리 예방할 수 있는 큰 장점이 있다. 현재 원자로 부위에 국부적으로 압전 AE센서가 사용되고 있으

나 본 연구의 주관점인 원자로 헤드부 CRDM관 상시감시용으로는 기존 센서의 한계가 있다고 판단되었다. 따라서 다중 센서 구현 및 고온 환경용 AE센서 개발이 관심사가 되었으며 이러한 목적에 부합한 광섬유 AE센서의 개발에 착수하게 되었다. 즉 최근에 개발되고 있는 광섬유 AE센서는 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 즉 전자기적 노이즈에 무관하여 열악한 환경에 사용 가능하고, 작은 사이

스로 설치가 용이하며, 센서 다중화가 가능하고, 고온에 적용이 가능한 큰 장점이 있다($\sim 400^\circ\text{C}$: polyimide coating, $\sim 700^\circ\text{C}$: gold coating)[1,2].

따라서 광섬유 AE센서는 기존의 PZT AE센서로는 적용이 어려운 원자력발전소의 원자로 헤드부분의 균열/누출의 온라인 모니터링에 적용이 가능하다.

2. FBG 광섬유 AE센서의 원리

다중 센서 구현 및 최적의 센서로서 FBG(fiber Bragg grating)를 이용하는 광섬유 센서를 선택하였으며, 그 원리는 Fig. 1과 같다. 광대역 스펙트럼을 갖는 빛을 커플러를 통해 FBG에 입사하게 되면 grating 간격에 따른 특정 파장의 빛만 반사되어 돌아오게 된다. 이 때 돌아온 협대역의 빛의 파장은 온도나 변형률에 따라 변하게 되므로 이 빛의 파장을 측정하게 되면 온도나 변형률을 측정할 수 있다. 하지만 빛의 파장을 측정하는 방법은 일반적인 측정 속도가 200 Hz 정도이고 스캔범위를 4 nm로 줄였을 때 20 kHz 정도로 측정할 수 있는 장비가 있으나 정적인 변형에는 적절하지만 수십~수백 KHz의 탄성과 검출과 같은 동적인 변형에는 적절치 않다[3]. 따라서 탄성과 검출을 위해서는 새로운 interrogation 방법이 필요하다. 즉, TLS(tunable laser source)를 이용하여 협대역의 레이저를 FBG 스펙트럼의 경사면 중간에 고정하게 되면 FBG의 변형에 따라 돌아오는 빛의 세기가 달라지므로 이를 측정하면 동적 탄성파를 검출할 수 있다.

3. 탄성과 검출 실험

탄성과 검출을 위한 FBG센서는 Fig. 2와 같이 두께 5 mm의 알루미늄 판에 완전히 접착한 형태와 외팔보 형태의 두 가지로 제작하였다. 외팔보

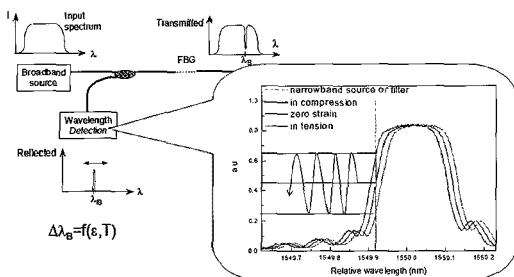


Fig. 1 Measuring principle of FBG sensor

형태의 FBG 센서를 제작할 때는 원하는 길이의 테프론 필름을 광섬유 밑에 끼우고 순간접착제로 광섬유를 고정한 다음 제거하였다. 외팔보 형태의 FBG센서는 표면 변형률의 영향을 받지 않고 탄성파만 검출가능하며 길이를 조절함으로써 다음 식과 같이 공진 주파수를 원하는 대로 설계할 수 있다.

$$f = \frac{c_f}{4l} \quad (1)$$

여기서 f 는 공진주파수, C_f 는 광섬유에서의 탄성파의 군속도, l 은 광섬유의 길이이다.

탄성과 검출을 위한 실험 셋업은 Fig. 3과 같다. TLS를 이용하여 FBG 스펙트럼에 경사면 중간에 레이저 파장을 고정하고 circulator를 통해 FBG로 들어갔던 빛은 PD를 이용하여 측정하였다. 비교를 위하여 60 kHz, 300 kHz의 공진주파수를 갖는 상용 PZT AE센서를 사용하였다.

4. 광섬유 AE센서 감도 향상

광섬유 AE센서는 FBG 스펙트럼의 경사면에 레이저의 파장을 고정하기 때문에 스펙트럼 기울기가 급할수록 감도가 좋다. 그러나 높은 공진주파수를 갖는 FBG센서를 제작하기 위하여 짧은 길이의 FBG grating을 사용하게 되면 Fig. 4와 같이 FBG의 스펙트럼이 넓어져서 감도가 낮아지게 된다. 일반적인 FBG 제작시에 apodizing 처리를 통해 사이드로브를 없애는 프로세스를 거치게 되면 FBG의

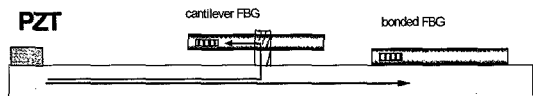


Fig. 2 Design of fiber optic AE sensor

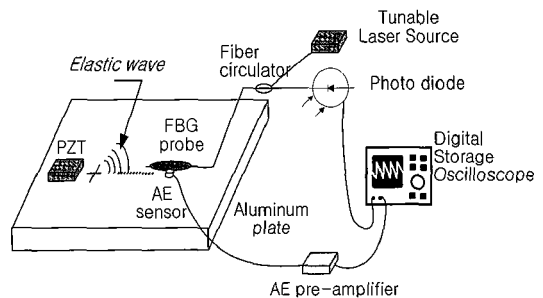


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

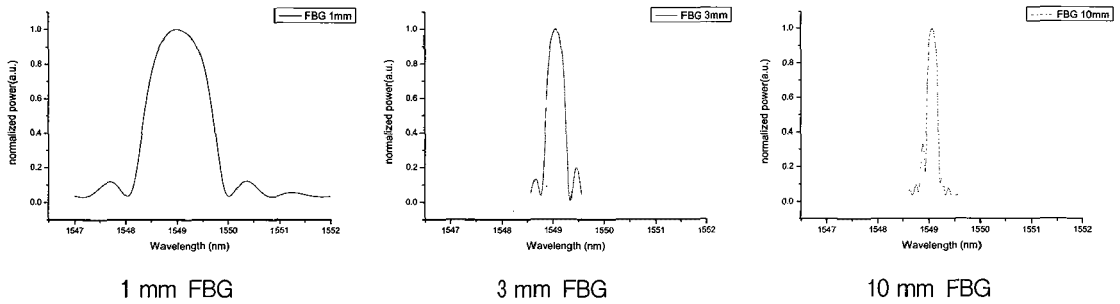


Fig. 4 FBG spectrum change by changing grating length

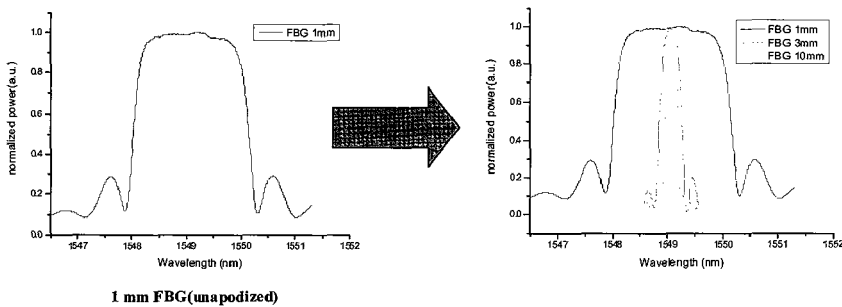


Fig. 5 Optimization of FBG spectrum using unapodizing

스펙트럼이 넓어지게 되므로 이러한 단점을 극복하기 위하여 unapodizing 처리를 통해 Fig. 5와 같이 FBG 스펙트럼의 기울기를 증가시켜서 광섬유 AE 센서의 감도를 향상시켰다.

탄성과 검출을 위한 FBG센서를 바닥에 완전히 접착한 상태에서 외팔보 형태로 제작하게 되면 FBG센서는 표면 변형률의 영향을 받지 않고 탄성파만 검출 가능하며 길이를 조절함으로써 공진주파수를 원하는 대로 설계할 수 있는 특징이 있다. 측정하고자 하는 대역의 주파수에 맞도록 공진주파수를 설계하게 되면 광대역 특성을 갖는 접착형보다

높은 감도를 얻을 수 있다. Fig. 6은 제작된 FBG센서가 설계된 주파수 특성을 잘 나타내는 것을 보여 준다.

5. 실험 결과

Fig. 7에 균열 신호를 모사하기 위해 transient 파형의 특성을 가진 연필심 파괴(pencil lead break)로 발생한 탄성파를 FBG AE센서와 상용 PZT AE센서를 이용하여 측정하여 나타내었다. 외팔보 형태의 FBG센서를 공진주파수를 달리하여 탄성파를 측정하여 상용 AE센서와 비교하였다. 250 kHz의 공진주파수를 갖는 FBG센서가 고주파 영역의 웨이브폼을 보여주는 것을 확인할 수 있다.

위에서 얻은 상용 AE센서와 FBG센서의 탄성파 신호를 비교 분석하기 위하여 FFT 변환을 통한 주파수 분석을 Fig 8에 나타내었다. 제작된 FBG센서는 모두 공진주파수인 60 kHz와 250 kHz에 샤프한 특성을 갖는 모습을 보였고 상용 AE센서는 프리앰프의 밴드패스 필터 주파수에 해당하는 브로드한 특성을 보였다.

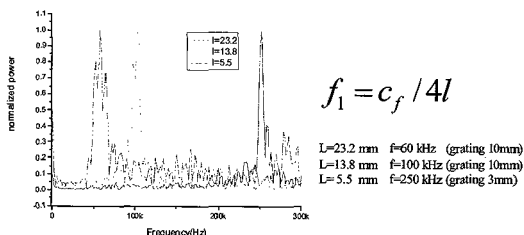


Fig. 6 Change of resonance frequency by length of grating

Fig. 9은 누출 신호를 모사하기 위하여 PZT pulser를 이용하여 연속 신호를 발생할 경우에 각 센서에서 측정된 신호를 나타내었다. PZT pulser에 60,100,200,300 kHz 해당하는 사인파 한 펄스를 발생시켜 측정된 탄성파를 60 kHz 의 공진주파수를 갖는 FBG센서로 측정하였다. 상용 AE센서는 자기

중심 주파수 부근의 파형만을 측정 가능한데 비하여 FBG센서는 전주파수 대역의 신호를 모두 측정할 수 있어서 보다 광대역의 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10에 위의 PZT pulser에 의한 탄성파 신호의 FFT를 통한 주파수 분석을 나타내었다.

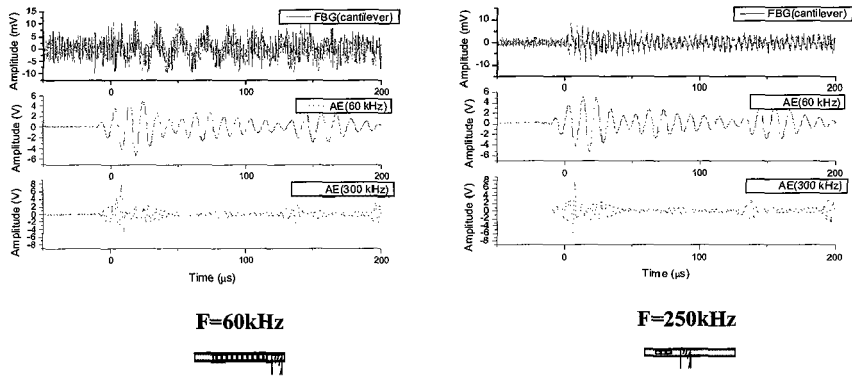


Fig. 7 Pencil break signal acquired by FBG and PZT AE sensor

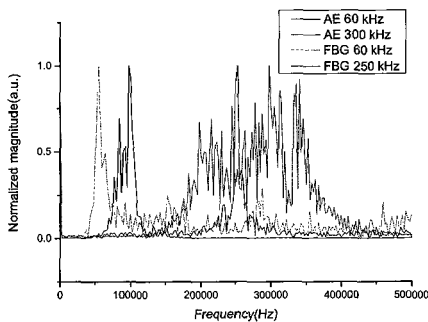


Fig. 8 Frequency analysis of pencil break signal acquired by FBG and PZT AE sensor

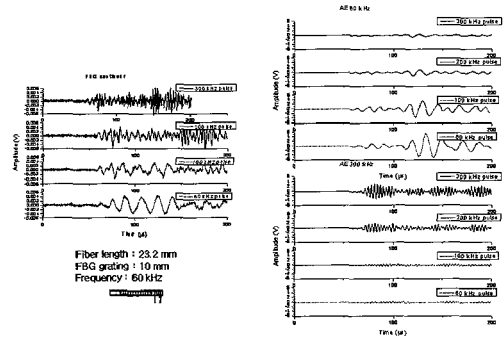
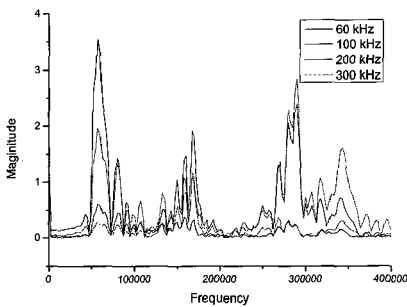
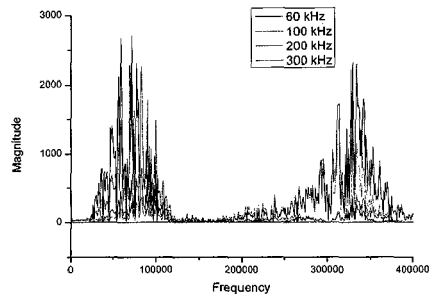


Fig. 9 PZT pulser signal acquired by FBG and PZT AE sensor by changing frequency



(a)



(b)

Fig. 10 Frequency analysis of PZT pulser signal acquired by (a) FBG and (b) PZT AE sensor by changing frequency

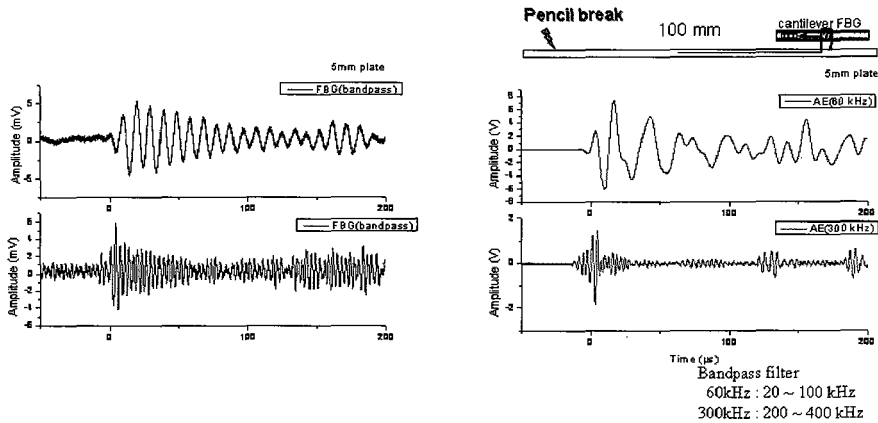


Fig. 11 PZT pulser signal acquired by FBG and PZT AE sensor

FBG센서의 공진주파수는 60 kHz이지만 하모닉 성분에 해당하는 180, 300 kHz 대역에서도 신호가 측정이 되어서 60 ~ 300 kHz로 변화하는 PZT pulser의 신호를 측정할 수 있었던 반면 상용 PZT AE센서의 경우 프리앰프의 밴드패스 필터 특성에 따라 Fig. 10(b)에서 보듯이 왼쪽은 60 kHz 센서 오른쪽은 300 kHz 센서의 신호로 해당하는 주파수 대역의 신호만을 보여주는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에 외관보 형태의 FBG센서의 신호에 상용 AE센서와 같은 주파수를 갖는 밴드패스 필터를 통과하여 측정된 신호를 나타내었다. FBG의 신호는 밴드패스 필터를 통과하자 상용 AE센서와 매우 유사한 형태를 가짐을 알 수 있다. 따라서 FBG센서에 적당한 필터를 통한 신호처리를 통해 상용 AE센서와 유사한 형태를 얻을 수 있다.

6. 결론

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. FBG 스펙트럼의 최적화, 공진주파수를 갖는 공진형 설계를 통해 광섬유 AE센서의 감도를 향상시켰다. Pencil break test를 통해 부착형 센서의 경우 광대역 특성을 보이며 긴 길이의 FBG grating이 감도가 더 좋음을 확인하였고 공진형 센서의 경우 설계된 공진주파수 특성을 보임을 확인하였다. PZT sine wave pulse test를 통해 광섬유 AE센서의 가진주파수별 감도 특성을 상용 AE센서와 비교하여 광섬유 AE센서가 더 우수한 광대역 특성을 보임을 확인하였다. FBG 광섬유 AE센서에 bandpass filter를 통해 신호처리를 하면 상용 AE센서와 유사한

파형을 보임을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-00467).

참고문헌

- [1] 권일범, "광섬유 센서를 이용한 구조물 안전 모니터링 기술", 비파괴검사학회지, 제 25권, 제 5호, pp. 400-404, (2005)
- [2] Dae-Cheol Seo, Il-Bum Kwon and Jung-Ju Lee, "Fatigue crack growth monitoring by fiber optic sensors in smart composite patch repairs," Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 286-289, (2006)
- [3] S. W. Park, D. H. Kang, H. J. Bang, S. O. Park and C. G. Kim, "Strain monitoring and damage detection of a filament wound composite pressure tank using embedded fiber Bragg grating sensors," Key Engineering Materials, Vol. 321-323 I, pp. 182-185, (2006)
- [4] A. Hongo, S. Kojima and S. Komazukai, "Applications of fiber Bragg grating sensors and high-speed interrogation techniques," Structural Control and Health Monitoring, Vol. 12, Issue 3-4, pp. 269-282, (2005)