

구조물의 균열 진전 탐지를 위한 광섬유 브래그 격자 센서

Fiber Optic Bragg Grating Sensor for Crack Growth Detection of Structures

권일범*[†], 서대철*, 김치엽*, 윤동진*, 이승석*

Il-Bum Kwon*[†], Dae-Cheol Seo*, Chi-Yeop Kim*, Dong-Jin Yoon* and Seung-Seok Lee*

초 록 구조물의 주요 부재들은 임의의 부분에 과대 하중이 작용하거나 반복 하중을 받아서 재료가 열화되면 균열이 발생한다. 이러한 균열은 구조물의 안전성을 평가할 수 있는 중요한 인자이며 균열의 진전 여부가 구조물의 안전성을 평가하기 위한 중요한 지표로 사용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 기존 균열이 진전하는지를 감시하기 위하여 광섬유 브래그 격자 센서를 개발하였다. 이 센서 시스템은 탐촉자, 파장 제어 광원부 및 광수신부, 그리고 가진부로 구성된다. 센서 탐촉자 부분은 광섬유 브래그 격자 소자만으로 구성된다. 파장제어 광원부는 전류공급회로와 DFB(distributed feedback) 레이저 다이오드로 구성되고 파장 제어 회로는 레이저 다이오드의 온도를 바꾸어 파장을 제어한다. 또한 가진부는 강철 낙하구에 의하여 구현한다. 이렇게 구성된 센서의 성능은 알루미늄판에 임의의 균열을 만들고 센서를 작동시키면서 출력 신호를 검토하면서 확인하였다. 광섬유 브래그 격자 센서의 출력 신호의 변화는 균열 길이 변화에 따라서 크게 변화되어 나타나므로 균열 진전 탐지 가능성이 충분함을 확인할 수 있었다.

주요용어: 광섬유 브래그 격자 센서, 낙하구, 파장제어 광원부, 균열 진전 탐지

Abstract There are to be some cracks on the material degradation part or the stress concentration parts of the main members, which carry on over-loads, of structures. Because these cracks can be used to evaluate the structural health status, it is important to monitor the crack growth for maintaining the structural safety. In this study, the fiber Bragg grating sensor with a drop ball was developed as a sensor for crack growth detection of an existing crack. The crack growth detection sensor was constructed with three parts: a probe part, a wavelength controlling light source and receiver part, and an impact part. The probe part was just formed with a fiber Bragg grating optical fiber. The wavelength controlling light source part was composed of a current supplying circuit, a DFB laser diode, and a TEC controlling circuit for wavelength control. Also, the impact part was just implemented by dropping a steel ball. The performance of this sensor was confirmed by the experiments of the crack detection with an aluminum plate having one existing crack. According to these experiments, the difference of the sensor signal outputs was correlated with the crack length. So, it was confirmed that this sensor could be applied to monitor the crack growth.

Keywords: Fiber Optic Bragg Grating Sensor, Drop Ball, Wavelength Controlling Part, Crack Growth Detection

1. 서론

지능형 구조물(intelligent structure)의 개념이 1980년

대에 소개되었는데, 지능형 구조물은 스스로 외부의 환경 변화를 감지할 뿐만 아니라 구조물 자체 내부의 안전한 상태를 감시할 수 있는 구조물을 의

미한다[1]. 구조물의 안전을 실시간으로 평가하기 위해서는 구조물의 외부 환경으로 온도, 압력, 진동 및 과대하중 등을 감지할 수 있도록 하여야 한다. 또한 구조물의 내부 요인으로는 과대 응력, 온도, 충격 등에 의한 손상 및 파손 여부 등을 감지할 수 있도록 하여야 한다. 이와 같이 구조물을 지능화하는 가장 기본적인 요구는 구조물의 안전성 감시를 위한 감지 기능을 구조물에 부여하는 것이다. 그에 따라서 구조물의 장기적인 안전성 감시를 위한 센서를 구하게 되었는데 광섬유 센서가 가장 주목받게 되었다. 그 이유로는 광섬유와 반도체 레이저를 이용한 광섬유 센서는 기존의 전자소자 대신에 빛을 이용하여 물체의 변화를 측정하고, 정보의 전달 또한 빛을 사용하므로 외란에 의한 전자기적 잡음에 영향을 받지 않는 장점이 있기 때문이다. 또한 광섬유 센서는 아주 작은 변위 또는 온도 등의 물리량을 매우 정밀하게 측정할 수 있으며 유리 성분으로 이루어져 있어서 부식에 강한 특징을 가진다 [1-5]. 광섬유 센서는 이러한 많은 장점으로 인하여 지능형 구조물의 측정에 적합한 센서로서 주목받게 되었다. 또한 이러한 광섬유센서는 항공우주분야, 의료기기분야, 토목구조물 등에 적용되어지고 있다 [6-8]. 한편, 구조물은 과대 하중을 받거나 노후화 등으로 인하여 하중담당 능력이 저하되면 응력이 집중되는 부위에 균열이 발생하게 된다. 이러한 균열은 일반적으로 구조 부재의 하중 담당 능력을 더욱 저하시켜서 균열을 지속적으로 성장할 가능성을 갖고 있다. 따라서 구조물을 안전하게 유지관리하기 위해서는 균열 발생이 있을 때 균열이 계속적으로 진전하는지에 대하여 면밀하게 감시하는 것이 필요하다. 이와 같이 구조물의 균열 진전을 감시하기 위해서는 장기간에 걸쳐서 안정적인 작동이 될 수 있도록 하는 센서가 필수적이다. 그러한 장기간의 모니터링을 위한 가장 유망한 센서가 광섬유 센서이므로 이를 이용한 균열 진전을 감시하는 연구를 하였다. 본 연구에서는 알루미늄 판에 균열을 제작하고 광섬유 브래그 격자 센서를 이용하여 균열 진전 여부를 검출할 수 있는 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 센서의 측정 원리

구조물의 균열 진전 여부를 탐지하기 위한 광섬유 브래그 격자 센서시스템과 낙하구를 이용한 가

진기로 구현하는 이 센서의 개념도는 Fig. 1과 같다. 이 센서는 판형태의 구조물에 균열이 발생하였을 때 그 진전 여부를 탐지하기 위하여 사용할 수 있도록 낙하구에 의하여 구조물에 탄성파를 발생시키고 이 탄성파가 균열 진전에 따라서 왜곡되는 정도를 광섬유 브래그 격자 센서에 의하여 신호를 취득하여 판단할 수 있도록 하였다. 즉, 판 형태 구조물에 균열이 발생한 초기 상태의 상황에서 Fig. 1에서와 같이 낙하구 장치와 광섬유 브래그 격자를 균열을 그 사이에 두고 설치한다. 센서를 설치한 이후에는 기본 신호 출력을 취득하기 위하여 낙하구를 낙하시키면서 광섬유 브래그 격자에서는 이 때 알루미늄 판에 발생하는 탄성파에 의한 알루미늄 판의 변형 신호를 취득한다. 그러면 이 데이터는 기준데이터로 균열 진전이 없는 상태에서의 데이터가 된다. 그 이후에 균열이 진전하게 되면 임의의 시각에 다시 불을 낙하시키면서 광섬유 브래그 격자를 사용하여 탄성파에 의한 알루미늄의 변형 신호를 취득하고 이렇게 얻어진 임의의 신호 출력으로부터 기준 신호 출력을 차감하면 그동안 균열 진전으로 변화된 탄성파 변형 신호만을 얻게 된다. 이 신호는 균열 진전과 관련 있는 양이 된다. 금번 연구에서 낙하구에 대한 장치 연구는 수행하지 않았지만 압전 가진기나 낙하구를 모터 등으로 구현하는 방법이 향후에 구현되어야 할 중요한 기술이다.

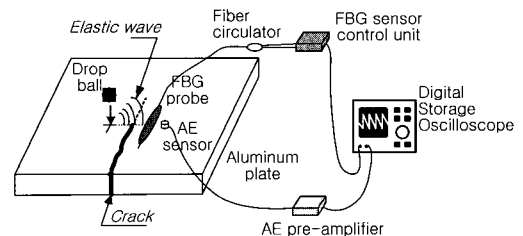


Fig. 1 Experimental setup for crack growth detection using fiber optic Bragg grating sensor with a drop ball

3. 센서의 제작

광섬유 브래그 격자와 낙하구를 사용한 센서 시스템은 Fig. 1과 같은데 광섬유 브래그 격자 센서 시스템은 탐촉자, 파장제어 광원부 및 광수신부, 그리고 가진부로 구성되었다. 센서 탐촉자 부분은 광섬유 브래그 격자 소자만으로 구성된다. 파장제어 광원부는 전류공급회로와 DFB 레이저 다이오드로

구성되고 파장 제어회로는 레이저 다이오드의 온도를 바꾸어 파장을 제어한다. 가진부는 낙하구에 의하여 구현한다. 실제 제작된 센서의 파장제어 광원부의 사진은 Fig. 2와 같다. 파장 제어 광원부는 광원인 DFB 레이저 다이오드와 이 광원을 구동하는 정전류 공급 회로와 광원의 파장을 센서 출력이 일정하게 출력되도록 제어하면서 동작하는 귀환 회로에 의하여 TEC(thermo electric cooler)를 제어하여 파장을 제어하는 파장 제어 회로로 이루어졌다. 광수신부는 광 검출기와 아날로그 증폭 회로로 구성되어있으며 자세한 사진은 Fig. 3과 같다.

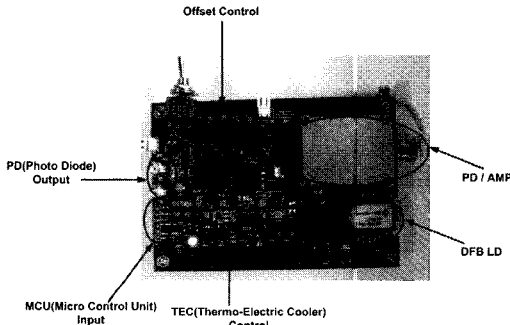


Fig. 2 Photograph of sensor board

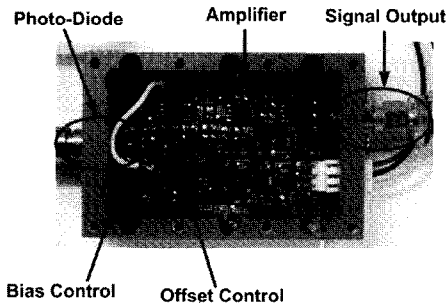


Fig. 3 Photograph of photo-receiver part

탐촉자는 광섬유 브래그 격자에 의하여 구성되는데 그 파장 특성을 Fig. 4에 보였다. DFB 레이저 다이오드의 파장 선폭은 브래그 격자 센서보다 매우 좁도록 브래그 격자의 선폭이 약 2 nm 정도 되는 것을 선정하여 사용하였다. 만약 브래그 격자 탐촉자가 부착된 구조물의 표면에 낙하구에 의하여 탄성파가 전달된다면, 브래그 격자의 중심 파장은 탄성파의 변형에 따라 브래그 격자 간격이 변화하면서 미세하게 흔들리게 될 것이다. 이 미세한 변화량을 측정하여 균열 진전 여부를 판단할 수 있도록

하였다. 보통의 브래그 격자 시스템의 경우 파장의 변화를 스캔을 통해 측정하여 변형량을 측정하는데 이 경우 속도가 느려서 동적 변형률 측정에 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 브래그 격자 반사 스펙트럼에서 최대 기울기를 갖는 곳에 DFB 레이저 다이오드의 중심 파장을 위치시켜서 브래그 격자 중심 파장이 이동함에 따라 광량이 변화가 비례적으로 나타나도록 함으로써 동적 변형률을 측정할 수 있도록 하였다. 그런데 외부 온도가 변화한다면 브래그 격자의 중심 파장이 온도에 의하여 이동될 것이고, 만약 온도에 의한 브래그 파장 이동량이 커서 DFB 레이저 다이오드 중심파장과 만나지 않는 영역으로 벗어나면 센서로서 작동하지 않을 것이다. 따라서 외부 온도 변화에 따라서 브래그 격자 중심파장이 이동하는 양만큼 DFB 레이저 다이오드의 중심파장도 이동시켜 주어야만 탄성파를 측정할 수 있는 브래그 파장 스펙트럼의 경사 부분에 레이저 다이오드의 중심파장을 위치시켜 탄성파 발생에 따른 브래그 격자의 떨림 현상을 측정할 수 있다. Fig. 5에는 DFB 레이저 다이오드의 온도를 제어함에 의하여 파장을 제어하는 예를 보였다. 온도 변화와 파장의 변화가 매우 정확하게 선형적으로 변화하였으며 그 변화율을 0.0917 nm/°C 로 나타냈다. 외부 온도 변화에 따라서 브래그 격자 파장이 이동하여 센서 출력이 떨어지거나 높아지면 파장 제어 회로에서는 TEC 제어 전압값을 Fig. 6과 같이 스캔하면서 광수신기의 출력값이 최대가 되는 곳을 찾은 다음에 미리 브래그 격자 반사 스펙트럼에서 구한대로 0.9 nm 만큼 DFB 레이저 다이오드의 중심 파장이 이동할 수 있도록 온도를 낮추어서 최대 기울기를 갖는 곳에 DFB 레이저 다이오드의 중심 파장을 고정하였다.

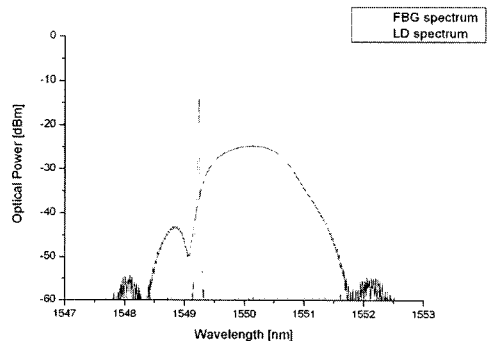


Fig. 4 Wavelength spectrum of FBG and DFB laser diode

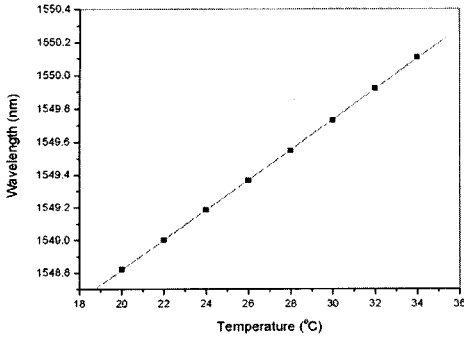


Fig. 5 Wavelength tuning according to temperature control of laser diode

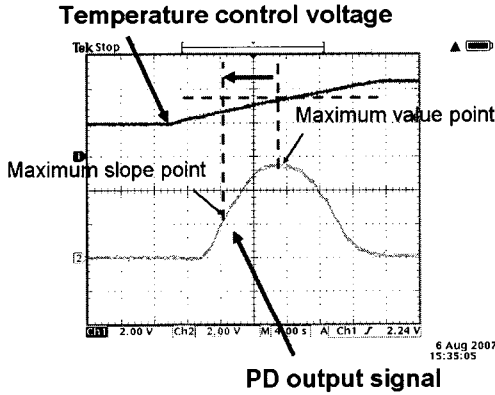


Fig. 6 TEC control on laser diode

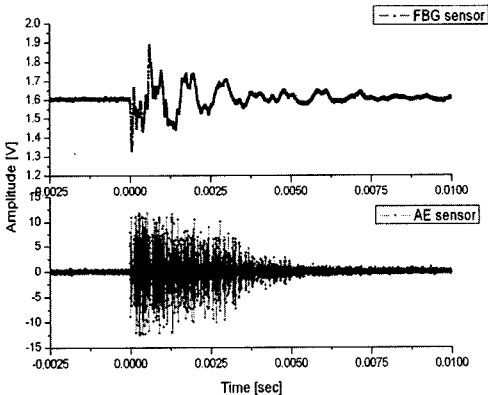


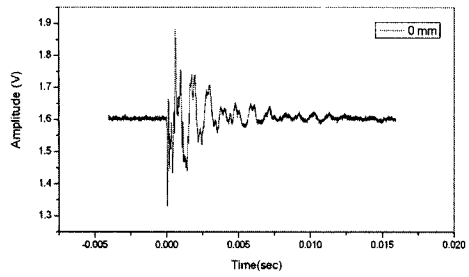
Fig. 7 Measurement of elastic wave on aluminum plate

이렇게 제작한 센서의 성능을 미리 알아보기 위하여 두께가 약 1 mm 정도 되는 얇은 알루미늄 판에 광섬유 브래그 격자 탐촉자를 붙이고 브래그 격자 탐촉자의 옆으로 약 2 cm 정도 떨어진 부분에 낙하구를 높이 약 90 mm 정도에서 떨어뜨리면서 탄성과 측정 시험을 수행하여 보았다. 물론 상용 음향방출 센서를 브래그 격자 탐촉자 옆에 붙여서 동시에 측정을 하여 Fig. 7에 보였다. 이 그림에서 볼 수 있는바와 같이 탄성과 측정을 위한 음향방출 센서는 판의 수직 방향의 변위에 비례하는 출력을 내는 센서이고 브래그 격자 센서는 판의 수평 변위에 비례하는 출력을 내는 센서이므로 두 센서의 파형이 완전히 다르게 나타나지만 초기 진동의 시작 위치나 감쇄하는 경향은 유사함을 알 수 있다.

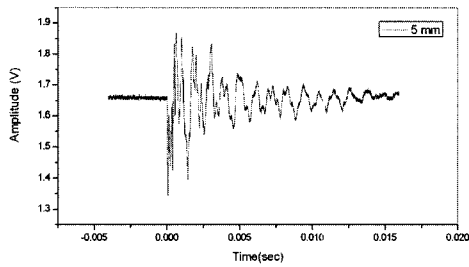
4. 균열진전 탐지 실험

광섬유 브래그 격자와 낙하구를 한쌍의 센서 시스템의 성능을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험셋업을 준비하였다. 우선, 두께 약 1 mm 정도의 알루미늄 판에 균열을 모사하기 위하여 약 2~3 cm의 틈을 쇠톱으로 만들었다. 그 후 이 모사 균열 선단이 브래그 격자 탐촉자 길이의 중간 부분과 일치시키고 균열 성장 방향과 브래그 격자 탐촉자의 방향을 평행하게 하여 균열로부터 약 10 mm 정도 떨어진 위치에 에폭시를 사용하여 브래그 격자 탐촉자를 부착하였다. 낙하구는 3.563 g의 중량으로 브래그 격자 센서 길이의 중간 부분으로부터 균열 선단을 중간에 두고 약 20 mm 정도 떨어진 위치에서 높이는 약 90 mm 정도에서 떨어뜨리는 것으로 하였다. 또한 광섬유 센서의 출력 신호와 비교하기 위하여 상용 음향방출 센서도 브래그 격자 탐촉자 바로 옆에 부착하였다.

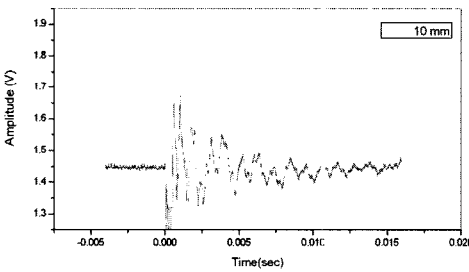
균열 진전은 5 mm씩 증가시켜 5, 10, 15, 20 mm에서 신호를 취득하였다. Fig. 8에 균열을 진전시켜가면서 측정된 FBG 센서의 시간영역 신호를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 이러한 시간 영역에서의 신호로부터는 균열 진전에 의한 영향을 추출하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 균열이 없는 초기 상태의 신호를 저장한 다음 각 균열크기에서 측정하는 신호에서 초기 상태의 신호를 차감한 시간 영역 신호를 가지고 분석해 보았다. Fig. 9에 균열의 진전시켜가면서 측정된 FBG 센서 신호에서 초기 상태의 신호를 차감한 시간 영역 신호를



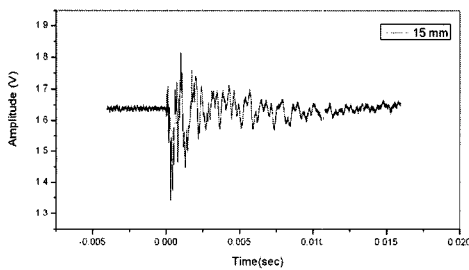
(a) crack growth of 0 mm



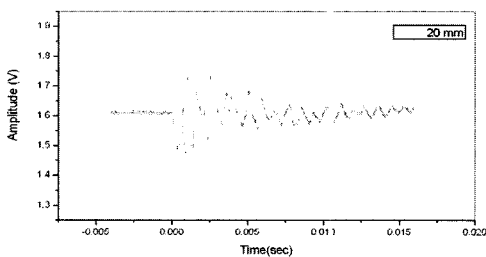
(b) crack growth of 5 mm



(c) crack growth of 10 mm

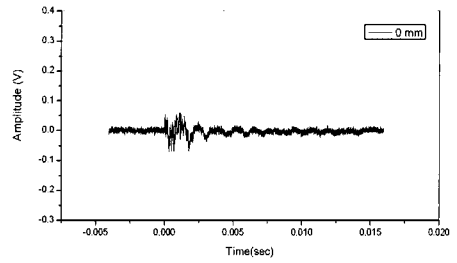


(d) crack growth of 15 mm

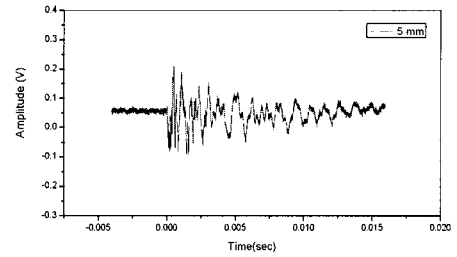


(e) crack growth of 20 mm

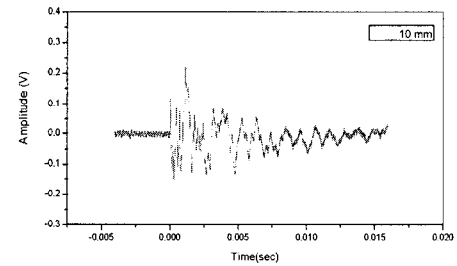
Fig. 8 Measured FBG sensor time-domain waveform as the crack growth increased



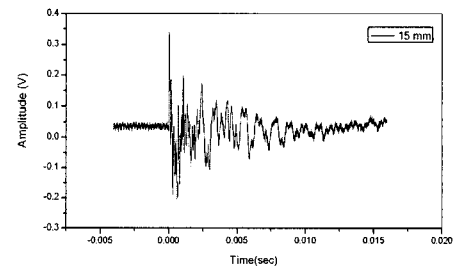
(a) crack growth of 0 mm



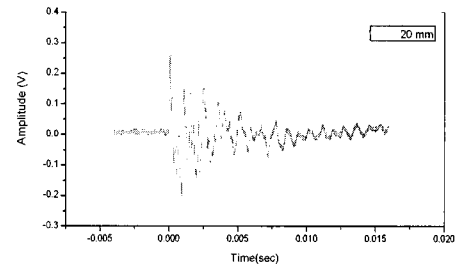
(b) crack growth of 5 mm



(c) crack growth of 10 mm



(d) crack growth of 15 mm



(e) crack growth of 20 mm

Fig. 9 Subtracted waveform which subtracts the reference waveform from the increased crack waveform

나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 균열 크기가 작을 때는 차감 신호의 크기가 작지만 균열이 진전함에 따라 신호의 크기도 커지고 특히 피크 값의 크기가 커짐을 알 수 있다. 따라서 이 차감신호들로부터 쉽게 균열 진전의 영향을 눈으로도 확인할 수 있다. 이를 보다 정확하게 계수적으로 나타내기 위하여 차감신호의 진폭이 임계값을 초과하는 데이터의 개수를 세어서 Fig. 10에 나타내었다. 임계값은 균열진전에 따른 영향을 확인하기 위하여 균열길이 5 mm에서의 신호의 진폭의 최대크기에 가까운 값으로 ± 0.21 로 정하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 임계값을 초과하는 데이터의 개수는 균열이 진전함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 측정된 FBG의 센서의 신호를 적절하게 신호처리하여 초기균열위치에서의 신호에 최대치에 해당하는 특정한 임계값을 초과하는 데이터를 뽑아낸다면 균열진전 탐지 센서로 활용할 수 있음을 확인하였다.

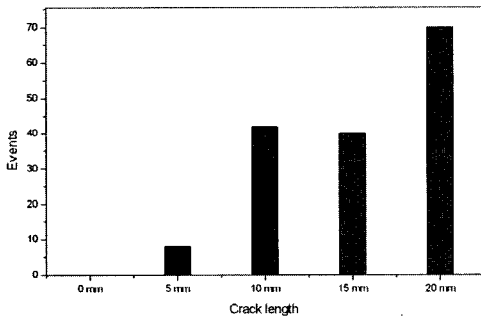


Fig. 10 The number of events over critical amplitude

5. 결론

본 연구에서는 구조물에 발생한 기존 균열이 진전하는지 감시하기 위하여 광섬유 브래그 격자와 낙하구를 하나의 센서 유닛으로 사용하는 센서 시스템을 구성하였다. 알루미늄 판에 임의의 균열 진전을 모사하는 실험 연구를 수행하여 이 센서시스템의 균열 진전 탐지 가능성을 확인하였다. 본 실험 연구에서는 약 5 mm씩 균열이 진전될 때 센서 출력 신호의 변화가 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 광섬유 센서 신호는 균열 진전 여부를 확인하는 탐지 센서로 실용화하기 위해서는 브래그 격자 탐촉자의 적용 위치, 낙하구의 조건, 신호처리 방법

과 특이신호의 임계값의 설정 등의 조건을 바꾸어 가면서 다양한 민감도를 갖는 센서를 여러 유형으로 구현할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 이러한 다양한 조건 변화에 대한 추가 연구를 수행할 예정이다. 또한 낙하구를 위한 장치 구현도 중요한 향후 연구 테마가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(M10203000002-07J0000-00210).

참고문헌

- [1] 권일범, "광섬유 센서를 이용한 구조물 안전 모니터링 기술", 비파괴검사학회지, 제25권, 제5호, pp. 400-404, (2005)
- [2] Yuwen Fang, Jin Qian, Minming Wang, Xuesong Li and Tianchu Li, "Distance scale calibration of optical fiber OTDR," Proc. SPIE, Vol. 3552, pp. 108-113, (1998)
- [3] 권일범, 김치엽, 서대철, "광섬유 OTDR 센서의 탐촉자", 비파괴검사학회지, 제25권, 제5호, pp. 350-355, (2005)
- [4] Duwayne R. Anderson and Florian G. Bell, "Optical time-domain reflectometry," pp. 1-10, Tektronix Inc, USA, (1997).
- [5] 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)
- [6] Eric Udd, "Fiber optic smart structure," pp. 1-21, John Wiley & Sons, Inc. New York USA, (1995)
- [7] 권일범, 김치엽, 최만용, 유재왕, "침입감시를 위한 광섬유 BOTDA 센서의 개발", 센서학회지, 제10권, 제3호, pp. 16-25, (2001)
- [8] 권일범, 김치엽, 김민수, 이왕주, "광주파수변조 광섬유 간섭형 센서의 개발", 센서학회지, 제9권, 제3호, pp. 163-170, (2000)