

분포형 광섬유 센서를 이용한 복합소재 대차 사이드프레임의 변형 모니터링

Strain monitoring of composite bogie side-frame using distributed optical fiber sensor

윤혁진[†] 김정석* 송광용** 김승철*** 나희승****
Yoon, Hyuk-Jin Kim, Jung-Seok Song, Kwang-Yong Kim, Seung-Chul Na, Hee-Seung

ABSTRACT

Recently the research for lightening the railway vehicle is actively made according to the demand of the environment-friendly technology development contributing to the energy cost reduction and the green growth. The railway vehicle lightweight research is expanded to the load-supporting first structure from the secondary structure which doesn't support the load. After the composite car body development used in the Korean tilting train is completed, the composite bogie frame development in which the weight reduction efficiency is large is progressed.

In this paper, distributed strain was monitored when the train load was added to the central part of the composite bogie side-frame. By using the optical fiber which was attached to the lower part of the side-frame and the developed Brillouin correlation domain analysis (BOCDA) system, the strain distribution could be measured with 3cm step over 3m section. This strain distribution was compared with the design value by the FE analysis when the load of 14ton and 18ton added. This experiment can verify the manufactured composite bogie side-frame.

1. 서 론

구조물의 변형 상태 및 파손 여부를 구조물의 운용 중에 실시간으로 감지하고 이상 유무에 따라 적절하게 대처할 수 있는 기능이 구조물 자체에 부가된 구조물을 스마트 구조물이라고 한다. 이러한 스마트 구조물의 기술이 철도차량에 적용된다면 보다 경량화되고, 막대한 피해가 발생하는 구조물의 파손을 미연에 방지할 수 있어 구조물의 유지 및 보수에 따른 비용 절감 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 대차프레임은 탑승한 승객으로 인한 수직하중과 열차의 추진 및 제동 하중을 지지하는 중요한 구조물로서 파손시 탈선을 유발하여 대형 사고를 일으킬 수 있으므로, 실시간으로 건전성을 모니터링하는 것이 필요하다. 특히 복합소재로 제작된 대차프레임은 기존 대차프레임에 비해서 무게를 경량화할 수 있을 뿐만 아니라, 복합소재의 강화섬유와 물성치가 비슷하여 구조물의 물성저하를 일으키지 않고 삽입이 용이한 광섬유 센서를 이용하여 스마트 구조물을 제작하기가 용이하다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원
E-mail : scipio@krti.re.kr TEL : (031)460-5565 FAX : (031)460-5289
* 정희원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원
** 비희원, 중앙대학교, 물리학과, 조교수
*** 정희원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 연구원
**** 정희원, 한국철도기술연구원, 기획부장, 책임연구원

본 논문에서는 복합소재 대차 사이드프레임의 중앙부에 열차하중을 가하고, 이 때 사이드프레임의 변형 분포를 연속적으로 모니터링 하였다. 사이드프레임 하부에 광섬유를 부착하였고, 개발된 브릴루앙 상관 영역 측정법(BOCDA)을 이용한 광섬유 센서 측정 시스템을 이용하여 3cm 간격으로 3m 구간에 걸쳐서 변형 분포를 측정할 수 있었다. 14ton과 18ton의 하중이 가하여 졌을 때 변형 분포는 FE 해석에 의한 설계값과 비교하였고, 전 구간에 걸쳐서 효과적으로 모니터링 할 수 있음을 확인하였다. 본 실험은 제작된 복합소재 대차 사이드프레임이 설계대로 되었는지를 검증할 수 있을 뿐만 아니라, 예측할 수 없는 파손이 일어나는 것도 감지할 수 있다

2. 분포형 광섬유 변형 측정 원리

빛은 투명한 유전 재료를 통과할 때 열정 동요에 의해서 발생하는 유전성의 비균질성에 의하여 일부의 빛이 산란된다. 빛이 유전 재료인 광섬유 내를 통과할 때에는 레일리(Rayleigh), 브릴루앙(Brillouin), 라만(Raman) 산란 등 자연적으로 다양한 산란이 발생한다. 이와 같은 광 산란은 광통신에서는 빛의 전송 손실을 가져오는 유해한 부분이나, 광섬유의 재료적인 성질로 모든 부분에서 빛이 산란되므로 이 정보를 이용하여 광섬유 전체를 광센서로 사용할 수 있는 유익한 부분이 되기도 한다. 특히, 브릴루앙 산란광은 광섬유에 가해지는 온도와 변형률에 따라 브릴루앙 주파수가 선형적으로 변화하는 성질을 보이므로, 식(1)을 사용하면 이러한 물리적인 변화량을 측정하는데 사용될 수 있다[1].

$$\nu_B(\Delta T, \Delta \epsilon) = \nu_{B0} + C_T \Delta T + C_\epsilon \Delta \epsilon \quad (1)$$

여기서 ν_{B0} 는 초기 브릴루앙 주파수, ΔT 는 온도변화, $\Delta \epsilon$ 은 변형률 변화, C_T 는 브릴루앙 온도계수 그리고 C_ϵ 은 브릴루앙 변형률 계수이다.

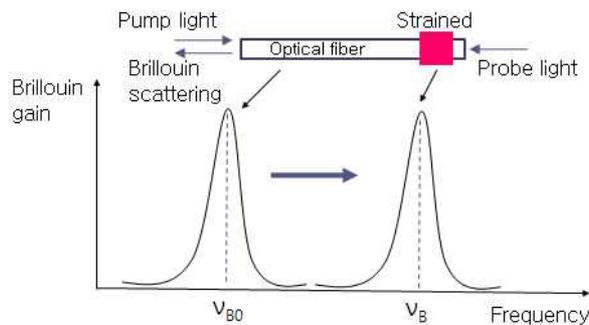


그림 1. 변형률이 가해진 경우 브릴루앙 산란광의 변화

브릴루앙 산란광은 광섬유에 빛을 입사하면 광섬유의 길이방향으로 모든 점에서 발생하므로, 이를 측정하는 시스템 구성에 따라 수 km 범위의 물리량(온도 및 변형률)을 측정하는데 사용될 수 있다. 특정한 지점의 물리량 측정을 위한 광섬유 센서로는 FBG (Fiber Bragg grating) 센서를 들 수 있다. FBG 센서는 측정하고자 하는 지점이 이미 결정되어 있는 경우에 사용될 수 있는 뛰어난 센서이지만, 모니터링 해야 할 영역이 넓고 파손이 일어날 지점을 미리 알 수 없어 모든 지점을 모니터링 해야 할 경우에는 브릴루앙 산란광을 이용한 센서가 유용하게 사용될 수 있다.

브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서는 광섬유 내에 입사된 광이 광섬유 코어 내를 투과하면서 발생하는 브릴루앙 산란 광을 측정함으로써 측정량 및 측정 위치의 정보를

연는다. 본 논문에서는 브릴루앙 산란을 측정하는 방법 중 지속파 형태의 펌프광과 프로브광을 사용하여 위치 선택적으로 유도 브릴루앙 산란을 발생시키는 방법인 브릴루앙 상관영역 측정법(Brillouin optical correlation domain analysis; BOCDA)을 사용하였다. BOCDA 시스템은 높은 공간 분해능, 빠른 샘플링 속도, 측정 지점의 임의 선택 등 많은 장점을 가지고 있다[2]. BOCDA 시스템은 SOCF(synthesis of optical coherence function)라고 불리는 광원의 주파수 변조를 이용한 위치 선택 방식을 사용하는데, 기본 개념도는 그림 2와 같다. 직접 전류 변조를 통해 광원의 주파수를 사인과 형태로 변조시킨다. 변조된 광파를 커플러를 이용해 양 방향으로 나눈 후, SSBM(single-sideband modulator)을 이용한 측파대 발생 방식에 의해 $\Delta\nu$ 의 주파수 offset을 갖는 프로브(Probe)광과 펌프(Pump)광을 발생시킨다. 두 광파는 측정하고자 하는 광섬유(sensing fiber)를 양방향으로 진행하면서 유도 브릴루앙 산란(SBS : Stimulated Brillouin Scattering)을 발생시킨다. 광원의 전류 변조에 의해 두 광파의 주파수가 같은 사인과 형태로 변하고 있기 때문에 그 주파수 차이에 해당하는 파워 스펙트럼을 시간에 따른 평균을 통해 관찰해 보면, 광섬유의 위치에 따라 주기적으로 변하는 형태로 나타나게 되며, 특정 지점에서만 위치 선택적으로 유도 브릴루앙 산란을 발생시킬 수 있게 된다.

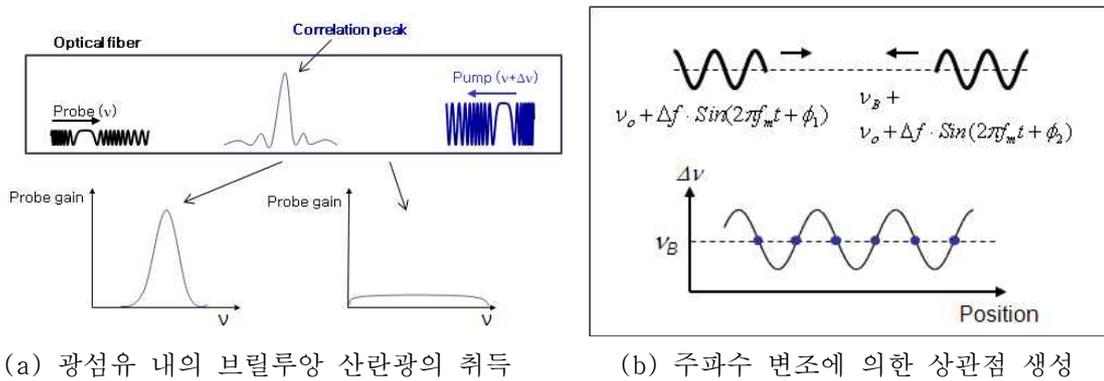


그림 2. 위치선택적 브릴루앙 산란광의 측정 원리

주기적으로 형성되는 주파수 차이의 peak을 상관점(correlation peak)이라 부르며, BOCDA 시스템의 브릴루앙 주파수 측정은 이러한 상관점에서 이루어진다. 광원의 주파수 변조가 사인과 형태로 주기성을 갖기 때문에 상관점은 공간에 주기적으로 나타나는데, 이러한 상관점의 주기가 시스템의 측정 범위가 된다. 측정하고자 하는 위치의 변경은 변조 주파수를 변경하여 가능하며, 시스템의 성능을 결정하는 파라미터인 공간 분해능, 측정 범위 등의 값은 모두 광원의 변조 파라미터에 의해 결정된다.

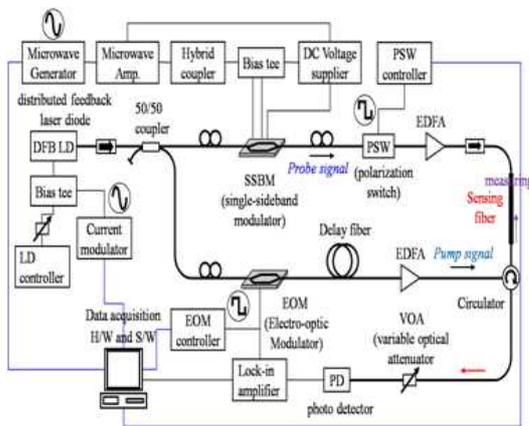
3. 실험과정 및 결과

그림 3은 전체적인 실험 구성도를 나타낸다. Glass/epoxy 복합소재로 제작된 대차 사이드 프레임의 양쪽 끝단을 미리제작한 지그위에 고정하였고, 중앙부에 열차 하중을 수직으로 가할 수 있는 하중 재하 시험기를 연결하였다. 두께 250 μm 의 광섬유를 복합소재 대차 사이드프레임의 하부에 길이방향으로 3m에 걸쳐서 부착하였고, BOCDA 시스템에 연결하였다.

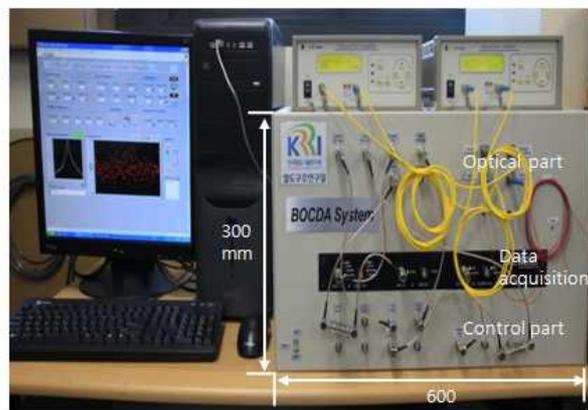


그림 3. 복합소재 대차 사이드 프레임의 수직하중 시험 셋업

브릴루앙 상관 영역 측정법(BOCDA)을 이용한 광섬유 센서 측정 시스템의 구성도와 사진을 그림 4에 나타내었다.



(a) 시스템 구성도

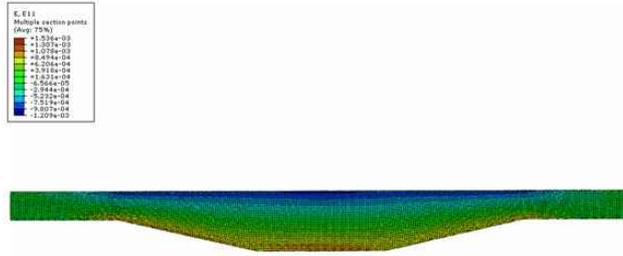


(b) 제작된 측정 시스템 시작품

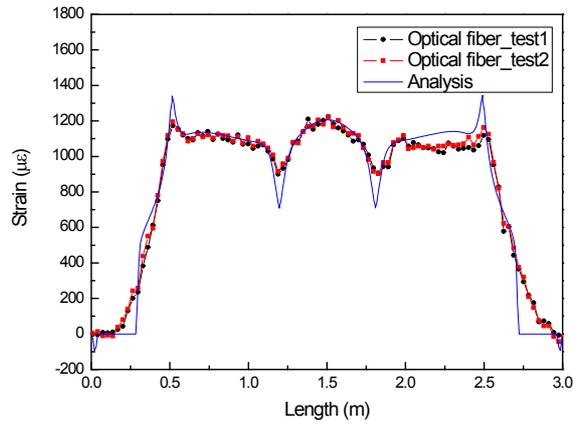
그림 4. 브릴루앙 상관 영역 측정법(BOCDA)을 이용한 광섬유 센서 측정 시스템

광섬유의 브릴루앙 산란광을 측정하기 위한 광원으로는 1550 nm의 중심 파장을 갖는 DFB LD를 사용하였고, 광출력을 커플러를 통해 펌프광과 프로브광 방향으로 분기시켰다. 확인 측정을 위해 펌프광에는 전기광학 변조기(EOM)를 설치하여 chopping을 가하고, 10 km의 광 지연 선로와 광섬유 증폭기(EDFA)를 통해 증폭시킨 후, circulator를 이용하여 측정용 광섬유(sensing fiber)로 진행시켰다. 프로브광 방향으로 진행한 광파를 SSBM을 통해 본래 광파로부터 브릴루앙 산란 주파수 $\Delta\nu$ 만큼 낮은 주파수를 갖는 프로브광으로 변환시켰다. 프로브광은 유도 브릴루앙 산란의 편광 효과를 제거하기 위해 편광 스위치(polarization switch; PSW)를 거쳐 isolator를 통해 측정용 광섬유로 진행시켰다. 브릴루앙 이득 스펙트럼(Brillouin gain spectrum; BGS)을 측정하기 위해 마이크로파 발생기(microwave generator)를 이용하여 $\Delta\nu$ 의 값을 10.2 - 11.2 GHz 영역으로 sweep하면서 확인 앰프를 이용하여 신호를 수집하였고 신호처리 프로그램을 통하여 전 구간의 브릴루앙 이득 스펙트럼을 측정하였고, 브릴루앙 주파수 변화를 변형률로 환산하였다[3].

수직 하중 14ton과 18ton이 가하여 졌을 때, 광섬유로부터 측정된 사이드프레임의 변형률과 FE 해석에 의한 데이터를 그림 5와 그림 6에 각각 비교하여 나타내었다.

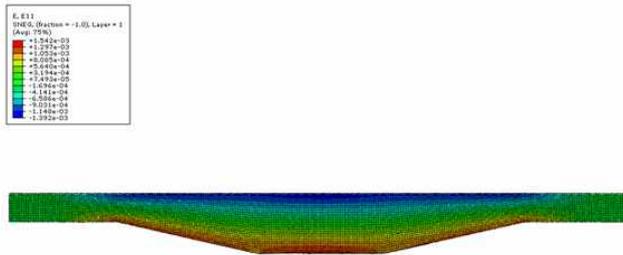


(a) FE 해석에 의한 전체 변형률 분포

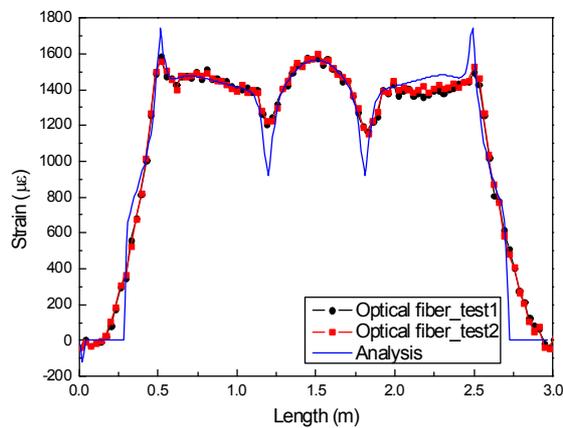


(b) 아랫면의 길이방향 변형률 분포

그림 5. 수직하중 14ton이 가하여 졌을 때 복합소재 대차 사이드프레임의 변형률 분포



(a) FE 해석에 의한 전체 변형률 분포



(b) 아랫면의 길이방향 변형률 분포

그림 6. 수직하중 18ton이 가하여 졌을 때 복합소재 대차 사이드프레임의 변형률 분포

14ton과 18ton의 수직하중이 복합소재 대차 사이드프레임에 가하여 졌을 때 BOCDA 시스템으로 취득한 광섬유 센서 신호와 FE 해석에 의한 설계값과 비교하여 표시하였다. 3cm 간격으로 3m 구간에 걸쳐서 변형을 분포를 측정할 수 있었다. 전 구간에 걸쳐서 두 값이 일치하였고, 효과적으로 전 구간을 모니터링 할 수 있음을 확인하였다. 이 때 사이드프레임의 변형을 분포를 연속적으로 모니터링 하였다. 보기의 사이드프레임의 변형은 중앙부를 중심으로 대칭되는 값을 갖도록 디자인되나, 제작상 두께 오차 및 설계 강성과의 부분적인 차이로 인하여 다른 값을 보일 수 있다. 본 실험에서도 중앙부에서 오른쪽 부분의 경사를 가지는 부분에서 왼쪽과 약간의 비대칭으로 인하여 설계 변형율와 약간의 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 이와 같이 전 구간의 변형율을 모니터링함으로써 실제로 제작된 구조물의 안전성을 확인할 수 있다. 본 실험은 제작된 복합소재 대차 사이드프레임이 설계대로 되었는지를 검증할 수 있을 뿐만 아니라, 예측할 수 없는 파손이 일어나는 것도 감지할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 복합소재 대차 사이드 프레임 하부의 변형을 분포를 표면에 부착된 광섬유를 이용하여 연속적으로 측정하였다. 변형을 분포의 연속적 측정은 초기의 의도처럼 설계대로 제작되어 같은 거동을 보이는지를 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 어디서 발생할지 모르는 파손을 감지하는데도 사용될 수 있다. 변형을 게이지를 이용한다면 위험이 발생할 부분을 예측하고 이 부분만을 모니터링하게 되나, 실제적인 파손 및 위험신호는 예측한 부분에서 일어나지만은 않으므로, 전구간을 모니터링하는 것이 필요하다. 광섬유로 측정한 대차 사이드 프레임 하부의 변형을 분포는 해석에 의한 결과와 잘 일치하였으며, 전 구간을 효과적으로 모니터링하였다.

참고문헌

1. 윤혁진, 송광용, 김정석, 신광복, 원종운, 나희승, “광섬유 브릴루앙 산란을 이용한 복합소재 외팔보의 변형을 측정,” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 1302-1307, 2009.11.19-21.
2. K. Hotate, T. Hasegawa (2000), “Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation,” IEICE Trans. Electron. E83-C, 405-412.
3. 윤혁진, 송광용, 김정석, 김현기, 신민호, 나희승, “철도 시설물 건전성 모니터링을 위한 분포형 광섬유 센서 개발,” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 95-100, 2009.11.19-21.