

# 광섬유센서를 이용한 열차하중 작용시 레일의 변형을 모니터링

## Strain monitoring of the rail during train loading condition using optical fiber sensor

윤혁진\* 송광용\*\* 김대상\*\*\* 김기환\*\*\*\* 김정식\*\*\*\*\* 권태수\*\*\*\*\* 나희승\*\*\*\*\*  
Hyuk-Jin Yoon, Kwang-Yong Song, Daesang Kim, Kihwan Kim, Jung-Seok Kim, Tae-Soo Kwon, Hee-Seung Na

### ABSTRACT

Recently, railroad construction has been increased all over the world and as the train is getting high-speeded, there has been a need for guaranteed safety, so that a requirement for health monitoring techniques for destruction that generated by gradually accumulated damages is now increasing. Especially the rail is crucial part that contact with wheel directly and delivers the train's load to a sleeper. It needs a technique that can guarantee a safety by sensing the possible cracks. In this paper, when train's load applied to the rail, strain distribution that introduced to entire length of rail is monitored using optical fibre. Optical fibre is used as a medium for measuring the strain and BOFDA (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) system is organized for measuring the distributed variation that implied to optical fibre. Optical fibre is attached at lower flange where tension is maximized when the load of train applied to the rail and strain gauge is implied together to compare the accuracy of measurement.

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 철도 건설이 증가하고 철도가 고속화되어감에 따라 철도의 안전을 확보하기 위하여, 점진적으로 누적된 손상으로 인하여 발생할 수 있는 파괴를 사전에 감지하기 위한 건전성 모니터링 기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 특히 레일은 차륜과 직접적으로 접촉하여 열차하중을 일차적으로 받아 침묵에 전달하는 중요한 부분으로, 발생할 수 있는 균열을 사전에 검지하여 안전을 확보할 수 있는 기술이 필요하다. 본 논문에서는 레일 전 구간의 변형을 모니터링하기 위하여 브릴루앙(Brillouin) 산란을 이용한 광섬유 센서 시스템을 제작하였고, 열차 하중이 레일에 가해졌을 때 레일 전 구간의 변형률 분포를 측정하였다.

### 2. 측정 원리 및 이론

본 논문에서는 외부 온도, 변형률, 압력 등을 측정하기 위한 다양한 광섬유 센서 기술 중 분포형으로 측정이 가능한 브릴루앙 산란광을 이용하는 방법을 시도하였다.

\* 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원  
E-mail : scipio@krii.re.kr TEL : (031)460-5565 FAX : (031)460-5289  
\*\* 비회원, 중앙대학교, 물리학과, 조교수  
\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜계도연구실, 선임연구원  
\*\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜계도연구실, 연구원  
\*\*\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원  
\*\*\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 대륙철도연구실, 책임연구원

이 방법은 식 (1)에서와 같이 브릴루앙 주파수의 변화가 광섬유에 가해지는 온도와 변형율의 변화와 상호 연관성을 가지고 있다는 것을 이용한다.

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

여기서  $\nu_{B0}$ 는 초기 브릴루앙 주파수,  $\Delta T$ 는 온도변화,  $\Delta \epsilon$ 은 변형율 변화,  $C_T$ 는 브릴루앙 온도계수 그리고  $C_\epsilon$ 은 브릴루앙 변형율 계수이다.

광섬유내에 발생하는 브릴루앙 산란을 측정하는 방법 중 지속파 형태의 펄프광과 프로브광을 사용하여 위치 선택적으로 유도 브릴루앙 산란을 발생시키는 방법을 브릴루앙 상관영역 측정법(Brillouin optical correlation domain analysis; BOCDA)이라고 하며, 높은 공간 분해능, 빠른 샘플링 속도, 측정 지점의 임의 선택 등 많은 장점을 가지고 있다[1].

BOCDA 시스템은 SOCF(synthesis of optical coherence function)라고 불리는 광원의 주파수 변조를 이용한 위치 선택 방식을 사용한다. BOCDA 시스템을 구동하기 위해서는 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 직접 전류 변조를 통해 광원의 주파수를 사인과 형태로 변조시킨다. 변조된 광파를 커플러를 이용해 양 방향으로 나눈 후, BOM을 이용한 측파대 발생 방식에 의해  $\Delta \nu$ 의 주파수 offset을 갖는 펄프광과 프로브광을 발생시킨다. 두 광파는 측정하고자 하는 광섬유(fiber under test; FUT)를 양방향으로 진행한다. 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 된다. 그림 1(b)는 공간적으로 한 주기에 해당하는 파워 스펙트럼의 형태를 보여준다.  $\Delta X=0$ 으로 표시된 특정 지점에서 그 주파수 차이가 일정하게  $\Delta \nu$ 로 유지되는 것을 볼 수 있다. 따라서  $\Delta \nu$ 가 그 지점의 브릴루앙 주파수와 일치할 경우,  $\Delta X=0$ 인 특정 지점에서만 위치 선택적으로 유도 브릴루앙 산란을 발생시킬 수 있게 된다.

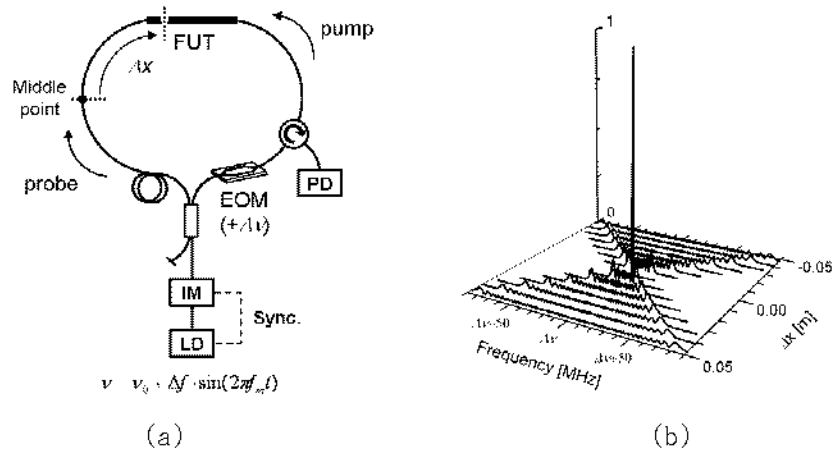


그림 1. (a) BOCDA 시스템 개념도 (b) 펄프광과 프로브광의 비트 주파수의 파워 스펙트럼

그림 1(b)와 같이 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 변경함으로 가능하며, 시스템의 성능을 결정하는 파라미터인 공간 분해능, 측정 범위 등의 값은 모두 광원의 변조 파라미터에 의해 결정된다.  $f_m$ 을 변조 주파수,  $\Delta f$ 를 주파수 변조의 폭이라고 할 때, BOCDA 시스템의 측정 범위  $R$ 과 공간 분해능  $\Delta z$ 는 아래의 식으로 주어진다.

$$R = \frac{V_g}{2f_m} \quad (2)$$

$$\Delta z = \frac{V_g \Delta\nu_B}{2\pi f_m \Delta f} \quad (3)$$

여기서  $V_g$ ,  $\Delta\nu_B$ 는 광섬유 내에서 빛의 군속도와 브릴루앙 이득 선폭이다. 측정 범위와 공간 분해능이 모두 변조 주파수의 함수로 주어지기 때문에 시스템의 성능을 나타내는 다른 파라미터로서 유효 측정점의 수  $N$ 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$N \equiv \frac{R}{\Delta z} = \frac{\pi \Delta f}{\Delta\nu_B} \quad (4)$$

따라서 BOCDA 시스템의 유효 측정점의 수는 광원의 주파수 변조 폭에 의해 결정되며, 일반 DFB LD의 경우 최대  $\Delta f \approx 10 \text{ GHz}$ 로서  $N \approx 1000$ 이다.

### 3. 실험방법 및 측정 결과

열차하중이 레일에 가해졌을 때, 레일의 변형율을 연속적으로 모니터링 하기 위하여 그림 2와 같은 실험장치를 구성하였다.

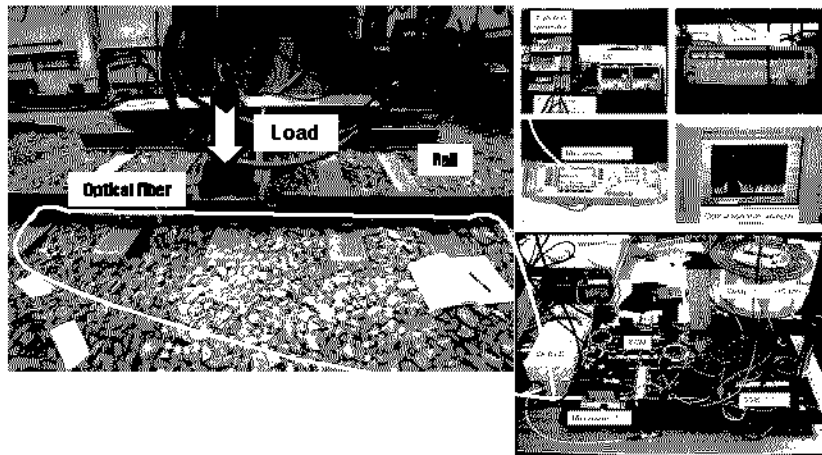


그림 2. 레일의 변형율 모니터링 시험을 위한 장치 구성

레도로부터 작용되는 열차하중에 의한 압력과 충격으로 침하가 되거나 변형이 되지 않도록 높이 3m의 노반을 견고하게 구축한 후, 그 위에 자갈을 도포하고 다짐작업을 수행하였다. 견고하게 다져진 자갈 위에 콘크리트 침목과 레일을 설치하여 레도부설 작업을 완료하였다. 레일의 하부 플렌지 외측에는 두께 250 $\mu\text{m}$ 의 SAMSUNG Single mode 광섬유를 에폭시를 이용하여 표면에 부착시켰다. 구축된 시험장치에 열차하중을 가하기 위하여 한국철도기술연구원에 구축된 종합레도노반시험기를 이용하여 레일에 직접적으로 143kN의 열차하중을 가하였고, 레일 하부 플렌지에 부착된 약 3m 길이의 광섬유를 사용하여 레일에 가해지는 변형율 분포를 모니터링 하였다. 변형율을 측정하기 위하여 BOCDA 시스템을 자체적으로 구성하였으며, 구성도를 그림 3에 나타내었다.

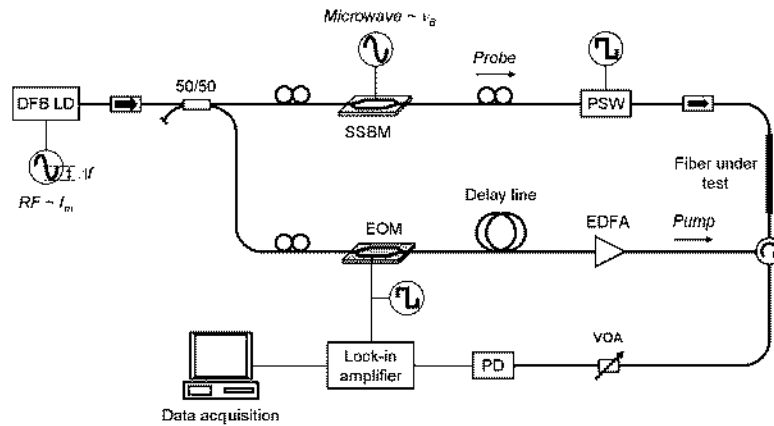


그림 3. 구축된 BOCDA 시스템 구성도

1550 nm의 중심 파장을 갖는 DFB LD를 광원으로 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(fiber under test)로 진행시켰다. 프로브광 방향으로 진행한 광파는 단일 측파 변조기(single-sideband modulator; SSBM)를 통해 본래 광파로부터 일정한 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 진행되었다. 브릴루앙 이득 스펙트럼(Brillouin gain spectrum; BGS)을 측정하기 위해 마이크로파 발생기(microwave generator)를 이용하여  $\Delta\nu$ 의 값을 10.3 - 11.3 GHz 영역으로 sweep하면서 확인 앰프를 이용하여 신호를 수집하였고 신호처리 프로그램을 통하여 전 구간의 변형을 분포를 모니터링 하였다. 그림 4는 실험을 통해 취득된 레일의 변형을 분포를 나타낸다.

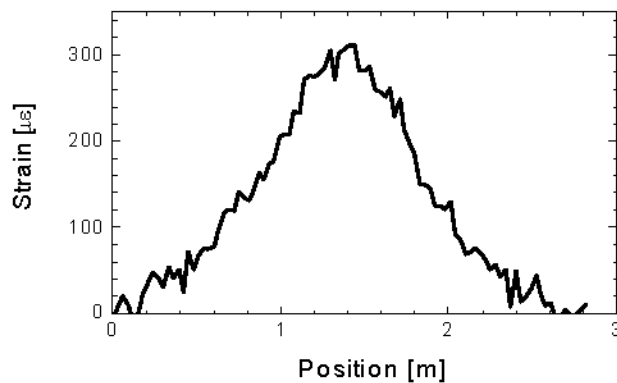


그림 4. 143kN의 열차하중시 레일의 변형을 분포

측정에 사용된 시스템의 공간 해상도는 3.6cm, 변형을 해상도는  $\pm 20\mu\epsilon$  이었다. 최대 변형율은 하중이 가해진 부분에서 측정되었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 열차하중이 레일에 작용할 때 레일의 변형을 분포를 연속적으로 모니터링하였다. 광섬

유를 변형률을 측정하기 위한 매개체로 사용하였고, 광섬유에 가해진 변형률 분포를 측정하기 위하여 BOFDA(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 시스템을 구성하였다. 광섬유는 열차하중이 레일에 가해졌을 때 가장 인장 변형이 많이 걸릴 위치인 하부 플렌지 외측 표면에 부착되었고, 전 구간의 변형률을 모니터링하였다. 열차하중이 작용하였을 때 영향을 미치는 거리는 약 3m 구간이었고, 변형률 분포는 좌우대칭이었다. 만약 특정 부분의 침묵이 손상되어 있거나 노반의 침하로 인하여 하중을 균일하게 지지할 수 없을 경우 해당 부분의 변형률 분포가 달라질 것이므로, 사고를 미연에 예방하는 건전성 감시 시스템으로 사용할 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 진행 중이다.

#### 참고문헌

1. 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.