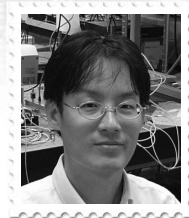


광섬유 센서 기술을 이용한 교통 재해 감시 기술 개발

(Develop of a transportation disaster monitoring system
using distributed optical fiber sensing technology)



윤 혁 진
한국철도기술연구원 철도구조연구실
선임연구원
scipio@krrire.kr



송 광 용
중앙대학교 물리학과 조교수
songky@cau.ac.kr

1. 광섬유 센서 기술

광섬유 센서 기술은 1960년대에 있었던 레이저(1960)와 낮은 손실을 갖는 광섬유(1966)의 개발에 힘입어 발전하기 시작하였고, 1970년대 이후부터 광통신 기술의 비약적인 발전과 상업화로 광소자들의 가격이 하락하면서 본격적으로 연구되고 사용되기 시작하였다. 광섬유 센서들은 크기가 작고 가벼우며, 한 라인으로 다중측정이 유리하고, 자유전자의 흐름이 없으므로 전자기전 간섭을 받지 않는다. 광섬유 전 구간의 물리량을 동시 다점으로 측정하기 위한 가장 단순한 형태로는 광 시간 영역 반사 측정법(Optical Time Domain Reflectometry - OTDR)이 있다. OTDR은 광 펄스를 광섬유에 입사시킨 후, 레일리 산란 현상에 의해 그 후면으로 발생하는 산란 신호를 측정하여 특정 위치에서 반사되는 신호의 크기를 측정하는 센서

이다. 따라서 주로 광섬유의 균열 여부 검사나 광섬유의 길이 측정용으로 많이 사용된다. OTDR은 레일리 산란 광의 변화를 이용하기 때문에, 레일리 산란의 낮은 신호 대 잡음 비 특성이나 단일 모드 광섬유 내에서 높은 파장의 광원에 대한 낮은 신호 특성을 갖는 단점이 있다.

기존 OTDR 시스템은 단지 위치에 따른 반사율만 측정할 수 있다는 단점이 있기 때문에 온도나 변형률 등의 물리량 측정에는 적합하지 않다. 이에 대한 대안으로 브릴루앙 산란을 이용한 브릴루앙 광 시간영역 분석법(Brillouin OTDA), 즉 BOTDA에 대한 연구가 처음 시작되었다. 브릴루앙 산란은 광섬유를 구성하고 있는 실리카 재료 내에서 발생하는 비선형 광학 현상 중 하나로, 광섬유 내에서 발생하는 브릴루앙 주파수 변화가 광섬유에 가해진 변형률과 온도에 선형성을 띄므로, 위치에 따른 변형률과 온도를 모니터링 하는데 사용된다. BOTDA 방식은 레일리 센

서에 비해 신호 대 잡음비가 크고, 온도나 변형률 등의 물리량 변화가 광 파위의 크기가 아닌 주파수의 변화로 나타나므로 측정값의 정확성이 훨씬 높다는 장점이 있으나 광원의 펄스폭의 한계로 인해 공간 분해능(게이지 길이)을 1m 이하로 낮추는데 한계가 있으며, 잡음이 많은 브릴루앙 센서의 특성상 평균화 시간이 필요하여 전체 영역의 측정에 수 분 이상의 시간이 필요한 단점이 있다.

광원을 펄스가 아닌 CW 형태의 펄프광과 프로브광을 사용하여 위치 선택적으로 브릴루앙 산란을 발생시키는 새로운 개념의 브릴루앙 센서인 브릴루앙 상관 영역 측정법(Brillouin optical correlation domain analysis; BOCDA)이 최근 개발되었다. BOCDA 시스템의 기본이 되는 기술은 SOCF(synthesis of optical coherence function)라고 불리는, 광원의 주파수 변조를 이용한 위치 선택 방식이다[1]. 이 방식은 1cm 이하의 공간 분해능, 1 kHz의 샘플링 속도, 측정 지점의 임의 선택 등 기존 브릴루앙 센서에서 구현될 수 없었던 다양한 장점을 가지고 있다.

현재 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있는 광섬유 센서의 기술 현황을 표 1에 나타내었다[2].

〈표-1〉 광섬유 센서 측정 기술

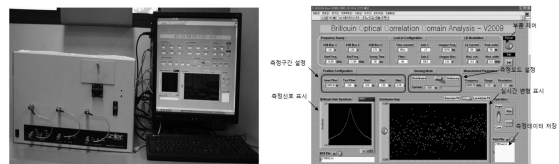
형식	FBG	OTDR	BOTDA	BOCDA
분류	포인트 센서 멀티플렉싱을 활용하여 다점 측정으로 확장 가능	분포형 센서 (전범위 측정)	분포형 센서 (전범위 측정)	분포형 센서 (측정지점 임의 선택기능으로 포인트 센서로 확장 가능)
측정 방법	브래그 격자를 광섬유에 생성시켜 그 지점을 센서로 사용	레이리 산란광의 크기 변화로 파손 및 균열 위치 측정	브릴루앙 산란 광의 주파수 변화로 온도 및 변형률 측정	브릴루앙 산란 광의 주파수 변화로 온도 및 변형률 측정
측정 정확도	$\pm 10^{-4}$ (변형률)	39 dB (동적범위)	$\pm 20 \times 10^{-6}$ (변형률)	$\pm 20 \times 10^{-6}$ (변형률)
측정 속도	1Hz~1kHz	수 초 ~ 수 분	수 분	수 초
측정 거리	-	40km	50km	1km
측정 신호	브래그 파장	레이리 산란	브릴루앙 산란	브릴루앙 산란

분포형 센서는 공간 모드를 구별하므로, 측정된 측정량은 일반적으로 분포 측정이라고 부르는 광섬유의 길이에 따른 위치 식별이 가능하다. 브릴루앙 현상을 이용한 분포 측정 기술 적용의 유연성으로 인하여 적용분야에 한계

가 없으며, 적용 대상 구조물에 따른 센서의 구성(형태, 고정법, 광섬유 코팅 등)을 적절히 선택하는 것이 중요하다.

2. 광섬유 센서 시스템 개발

측정용 광섬유의 임의의 위치에 가해지는 변형의 위치와 크기를 취득하기 위하여 광섬유 브릴루앙 상관영역 측정(BOCDA) 방식을 이용한 광섬유 센서 시스템을 개발하였다[3]. 본 시스템은 광섬유 내에서 발생하는 브릴루앙 산란을 위치 선택적으로 발생시켜 측정하는 방식을 사용하여, 측정 물리량의 변화값과 정확한 위치를 빠른 측정 속도를 가지고 식별해 낼 수 있다. 본 시스템에서는 광통신용으로 사용되는 단일모드 광섬유를 센서화를 위한 별도의 조치 없이 그대로 사용하므로, 적은 비용으로 수 km를 초과하는 장거리 구간에 대해서도 감시를 수행할 수 있다. 개발된 시스템의 구성도와 시작품 사진을 그림 1에 나타내었다. 시스템을 구성하고 있는 부품들의 제어 및 신호 분석을 위한 프로그램은 National Instrument사의 LabView를 이용하여 작성되었다. 신호처리 소프트웨어는 광섬유 센서 시스템에 광원을 공급하게 하고, 되돌아온 광파로부터 브릴루앙 이득 스펙트럼을 분리한 후 이를 변형률로 환산하게 한다. 개발된 소프트웨어는 전체 측정거리, 시작지점, 끝지점, 측정간격을 선택하게 할 수 있으며, 전 구간 스캐닝 또는 특정 지점 스캐닝등의 측정 모드 선택 기능과 측정된 데이터의 실시간 표시 및 저장 기능을 가지고 있다.

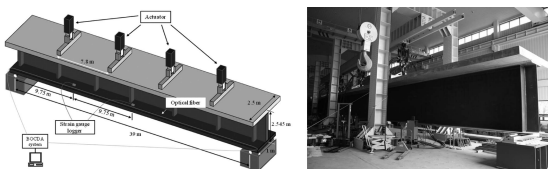


〈그림 1〉 광섬유 센서 측정 시스템 시작품 및 구동 S/W

3. 시스템 적용

3.1 교량 모니터링

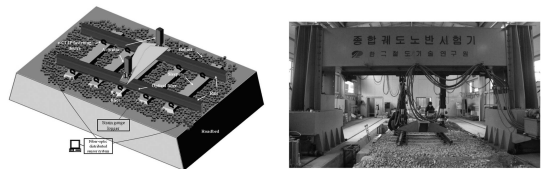
우리나라는 평지에 비해서 산악 지형이 많아서 도로 및 철도 교통 시설을 부설하기 위해서는 교량을 부설하여야 하는 경우가 많다. 지진과 같은 갑작스러운 자연재해로 인한 교량 붕괴 사고는 막대한 경제적 손실뿐 아니라 수많은 인명 피해를 가져올 수 있기 때문에, 사고를 미연에 방지하기 위한 구조물의 모니터링 기술은 매우 중요하다. 2007년 8월 미국 미니아폴리스에서 발생한 대형 교량의 붕괴사고에서 알 수 있듯이 정기적인 안전점검만으로는 사고를 100% 예방할 수 없으며, 상태 측정이 실시간으로 이루어지는 것이 바람직하다. 최근 수직하중 재하시 강합성교의 변형을 분포를 분포형 광섬유 센서 시스템을 이용하여 실시간으로 측정하는 연구가 수행된 바가 있다[4]. 길이 40m, 폭 1m, 높이 2.245m의 I형 거더 위에 폭 2.5m, 두께 0.3m의 콘크리트 상판을 제작하여 39m 거리의 두 받침대에 위에 설치하였고, 교량 상판 위에 4개의 수직하중 시험기를 위치시켰다. I형 거더의 하부 플렌지 외측 끝단에서 25mm 떨어진 외측 표면에 에폭시를 이용하여 광섬유를 부착하였다. 부착된 광섬유는 개발된 브릴루앙 상판 영역 측정법을 이용한 분포형 광섬유 센서 측정 시스템에 연결하였다. 4개의 수직하중 시험기를 이용하여 하중 사이클을 재하하면서 교량에 변형을 가하였고, 이때의 위치에 따른 길이방향 변형을 분포를 모니터링하여 변형 형상을 유추하였다. 측정 간격은 20cm, 측정 길이는 39m 이었다.



〈그림 2〉 수직하중 재하시 교량 변형 모니터링

3.2 철도 레일 모니터링

레일은 열차의 차륜과 직접적으로 접촉하여 열차하중을 일차적으로 받아 침묵과 도상을 통하여 넓게 노반에 분포시키며 평활한 주행면을 제공하는 등 열차의 안전운행을 위한 구성 재료 중 가장 중요한 요소이다. 최근 기상이변으로 인한 하절기의 폭염, 지각 변동에 의한 지진 등은 체결장치와 침묵에 의한 레일의 구속을 완화시켜 레일의 좌굴 현상을 일으킨다. 이는 열차 탈선을 유발하여 커다란 인명손실과 철도 선로 복구에 막대한 시간을 소요하게 한다. 이를 사전에 예방하기 위하여, 열차 하중 작용시 레일 전체 구간의 변형을 실시간으로 모니터링 하기 위한 연구가 수행되었다[5]. KS 60 레일의 저부 끝단에서 47.5mm 떨어진 외측 표면에 레일의 길이방향으로 2.8m 길이에, 직경 250 μ m의 광섬유를 표면에 부착하였고, 부착된 광섬유는 분포형 광섬유 센서 시스템에 연결하였다. 레일의 좌측과 우측에 열차하중을 가할 수 있도록 레일의 중간부에 지그를 설치하였고, 하중을 제어 할 수 있는 수직하중 시험기 2대를 왼쪽과 오른쪽 레일 위에 위치시켰다. 143kN의 하중을 부과하는 동안 레일의 변형을 실시간으로 모니터링 하였다. 3cm 간격으로 측정되었고, 이 때 공간해상도는 3.6cm, 포인트 당 측정속도는 0.4 sec 이었다.



〈그림 3〉 열차 하중 재하시 레일 모니터링

3.3 옹벽 모니터링

옹벽은 사면을 절개하여 도로 및 철도를 부설하고 토사 유출을 막기 위하여 설치하거나, 평지에서 법면을 최소화 하면서 노반을 구축하기 위하여 주로 사용된다. 설치된 이후에 폭우나 지진 등에 의해서 토사가 밀려오면서 붕괴되거나, 통과하는 교통수단에 의한 반복하중, 진동에 의한 영향 등으로 인해서 국부적인 변형이 발생할 경우, 치명적

인 사고를 유발시킬 수 있다. 따라서 사용기간 동안 충분한 내구성을 확보하여야 하며, 내구년수는 도로 구조물의 경우는 70년, 철도구조물의 경우는 100년으로 긴 기간이므로, 옹벽에 삽입되어 오랜 기간 동안 지속적으로 변형을 모니터링 하는 기술이 필요하다. 광섬유를 옹벽 제작시 수직방향으로 삽입하여, 생존성을 확인하고 삽입된 이후 광섬유에 가해진 초기 변형율을 모니터링 하는 연구가 수행되었다[6]. 지반을 보강하기 위하여 30cm 간격으로 토사를 채우면서 토목섬유를 삽입하여 보강하고 높이 3m의 노반을 견고하게 구축한 후, 전면부의 토목섬유에 900 μ m 코팅된 단일모드 광섬유를 높이 방향으로 부착하고, 콘크리트를 타설하여 옹벽을 제작하였다. 옹벽에 삽입된 광섬유는 개발된 분포형 광섬유 센서 시스템에 연결하였다. 콘크리트 경화 후 옹벽에 삽입된 광섬유의 생존 검사가 수행되었고, 이 광섬유를 이용하여 옹벽의 초기 변형율 분포를 측정하였다. 삽입된 광섬유는 옹벽의 붕괴시까지 변형을 모니터링 하는데 사용될 수 있다.



(그림 4) 법면을 최소화하기 위해 구축된 옹벽의 모니터링

4. 결론

교통 재해를 감시하기 위해서는 자동화된 상시 계측 관리 기법과 손상의 초기 탐지 기법의 개발 등의 연구가 중요하다. 그 예로, 구조물에 변형율 게이지나 가속도계 등과 같은 센서를 부착하여 변형률, 하중, 변위, 진동 등을 측정하여 구조물을 감시하는 기술이 부분적으로 시행되고 있으나, 전자기적 간섭이나 부식 등으로 인한 열악한

측정 환경, 내구성 부족 등의 어려움으로 인해 장기간 측정에는 현실적인 문제를 안고 있다. 본 논문에서 제안한 광섬유 센서를 이용한 교통 재해 감시 기술은 전자기장에 영향을 받지 않으며 반영구적으로 구조물에 삽입되어 측정이 용이하고, 실시간 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 현재 교량, 레일, 옹벽 등에 시스템이 적용되어 적용 가능성이 입증되었으며, 상용화를 위하여 내구성 및 환경성 시험 등 추가적인 기술 개발이 지속적으로 수행되고 있다. 이 시스템은 주로 철도 구조의 감시를 위하여 디자인된 것이지만, 사회 기반 시설에 확대 적용할 수 있다.

참고문헌

1. 윤혁진, 송광용, 김정석, 2009, "브릴루앙 상관 영역 측정법을 이용한 분포형 광섬유 센서 장치 및 그 센싱 방법", 국내특허 출원중.
2. 윤혁진, 김정석, 송광용, 2010, "분포형 광섬유 센서 기술을 이용한 철도 궤도 감시 시스템 개발", 한국철도기술, vol.30, pp. 57-62.
3. 윤혁진, 송광용, 김정석 등, 2009, "철도 시설물 건전성 모니터링을 위한 분포형 광섬유 센서 시스템 개발", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 93-100.
4. H.J.Yoon, K.Y.Song, H.M.Kim, J.S.Kim, "Strain monitoring of composite girder bridge using distributed optical fibre sensor system", 11st International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, June 5-9, 2011.
5. H.J.Yoon, K.Y.Song, J.S.Kim, D.S.Kim "Longitudinal strain monitoring of rail using a distributed fiber sensor based on Brillouin optical correlation domain analysis", NTD&E international, submitted.
6. 윤혁진, 송광용, 김대상 등, 2009, "광섬유가 삽입된 철도용 보강토 옹벽의 초기 변형율 측정", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 1509-1513.