

광섬유 FBG 센서를 활용한 조류발전시설물의 거동 분석 및 손상검색

Structural health monitoring and damage detection for a tidal current power plant structure using fiber Bragg grating sensors

박현준† · 윤정방* · 박진순**

Hyun-Jun Park, Chung-Bang Yun and Jin Sun Park

1. 서 론

최근 친환경 무공해 에너지의 하나로써 조류발전에 대한 관심이 높아지고 있다. 조류발전은 조류의 흐름이 빠른 곳을 선정하여 그 지점에 수차발전기를 설치하고, 자연적인 조류의 흐름을 이용하여 설치된 수차발전기를 가동시켜 발전을 하는 것으로 비용이 적게 들고 환경적으로 해양환경에 미치는 영향이 거의 없어 현재 선진국을 중심으로 실적용을 위한 연구를 진행 중이다. 국내에서도 최초로 현재 한국해양연구원에서 우리나라 조류발전의 최적지인 울돌목을 대상으로 1000kW급 시험 조류발전 시스템 건설을 추진하고 있다.

이러한 시험 조류발전 시스템은 발전설비(수차, 축계, 증속기, 발전기, 전력변환장치 등)와 발전설비 지지구조물로 이루어져 있으며 발전설비 지지구조물은 조류발전의 효율성, 시공성, 안전성 및 경제성을 고려하여 강관부재로 구성된 재킷(Jacket)식 구조물의 형태로 시공되었다. 이 지지구조물은 발전설비의 위치를 고정하고 발전설비가 계획대로 동작하게 하기 위한 역할을 수행하며, 그에 따라서 발전설비 지지구조물의 건전성을 평가하는 것은 발전시스템 전체의 지속성을 보장하는 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

본 연구에서는 최근 활발한 연구가 진행 중인 광섬유 FBG 센서를 활용하여 이러한 조류발전시설물의 건전성 평가 기법을 개발하였다. 손상 검색 알고리즘 개발을 위하여 여러 분야에서 활용 중인 Principle Component Analysis (PCA) 기법을 적용하였으며 이를 검증하기 위하여 1/20 축소모형을 통한 실내 실험을 수행하였고, 구조물의 손상 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 알고리즘을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 광섬유 FBG 센서

광섬유 센서의 경우 전자소자 대신 빛을 이용하여 측정 및 신호전달을 하므로 외부 전자파 장애에 의한 잡음이 없다. 또한 크기가 작고 가벼우며, 광 손실이 적고 석영을 주 재료로 하여 부식이 적고 내구성이 강하다는 장점이 있다.

특히 요즘 가장 많이 사용되고 있는 광섬유 브래그 격자 (FBG) 센서의 경우 한 가닥의 케이블을 통해서 다 지점의 변형률 및 각종 물리적 항목들을 계속할 수 있는 멀티플렉싱(multiplexing)이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 광섬유 브래그 격자의 중심 파장을 서로 다르게 하여 변형이 발생할 때 중첩이 안 되도록 서로 다르게 구성하면 광섬유 한 line에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열하여 멀티플렉싱(multiplexing)이 가능해진다. (Udd et al. 1995)

2.2 Principle Component Analysis (PCA)

일반적으로 데이터의 차원을 축소시키고 불필요한 정보를 제거하기 위하여 주성분 분석(Principal Component Analysis: PCA)과 같은 데이터 압축기법을 데이터 처리 모듈로 사용한다. 주성분 분석은 여러 개의 데이터 셋(벡터)들로 이루어진 다차원 공간에서 차원해석을 통하여 소수의 주된 독립 좌표계(principal vectors)를 구하여, 원래 데이터 셋을 이 좌표계로 투영하여 분석하는 다변량 통계분석의 고전적인 방법이다(Krzanowski et al, 2000).

측정 데이터가 $\{x\}_j = \{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jN}\}^T (j=1, 2, \dots, M)$ 이고, 여기서 T 는 전치행렬, M 은 전체 측정횟수인 경우 $N \times N$ -차원의 공분산 행렬 $[C]$ 는 다음과 같다.

$$[C] = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (x_j - \bar{x})(x_j - \bar{x})^T \quad (1)$$

여기에서 $\{\bar{x}\}$ 는 $\{x\}$ 의 평균이다. 이후 행렬 $[C]$ 의 특이값 분해(singular value decomposition; SVD)를 구하며, 이때

† 교신저자; 한국과학기술원
E-mail : hj.park@kaist.ac.kr
Tel : (042) 350-3652, Fax : (042) 350-8290

* 한국해양연구원

** 한국해양연구원

$[A]$ 는 $[C]$ 의 특이행렬이고, $[A]$ 는 고유치 대각 행렬이다.
 $[C] = [A][A][A]^T$ (2)

이 때 주성분인 $\{z\}$ 는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$z_j = [A]^T(x_j - \bar{x})$$
 (3)

주성분 분석은 전체 분산 혹은 데이터 범위에 조금이라도 영향을 미치는 데이터들을 선형 결합함으로써 차원을 축소시키는 것이다. 본 연구에서는 FBG센서로부터 획득한 정적 변형률 데이터에서 불필요한 소음을 제거하고 차원을 감소하기 위해 주성분 분석을 이용하였다.

3. 실험 결과 및 분석

실제 울돌목에 위치하고 있는 조류발전시설물 및 1/20 실 내실험체의 사진을 그림 1에서 확인할 수 있다. 구조물에 가해지는 가장 주된 하중이 하루에 두 번씩 발생하는 조석에 의한 횡하중이기 때문에 이를 모사하고자 정적 횡하중 재하시험을 수행하였다. 또한 구조물에 다양한 환경적 변화를 모사하기 위하여 다양한 온도 조건을 통한 구조물의 거동 역시 계측하였다. FBG 광섬유 센서는 그림 2와 같이 총 11 지점에 대해 설치 후 계측하였고, 온도에 의한 중심과장의 변화를 상쇄하기 위하여 온도 보상용 dummy센서를 두 개 추가하여 총 13개의 FBG 센서를 설치하였다. 이후 다양한 외부 환경(온도 변화, 정적 하중 재하)에 노출시킨 상태로 약 2주 정도 5분 간격으로 각 FBG센서의 중심과장을 계측하여, 구조물의 손상 전 baseline data로 수집, 분석하였다.

이 후 그림 3과 같이 구조물의 중요 부재에 대해 약 50%의 단면 손상을 가하고 이 후에 정적 재하를 통한 손상 후 데이터를 계측하였다.



(a) 실제 구조물 (b) 실험체

그림 1. 조류발전시설물

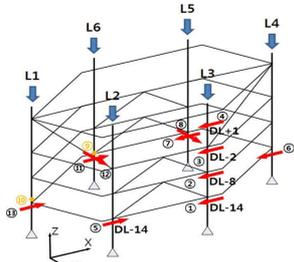


그림 2. 센서 설치도



그림 3. 구조물 손상

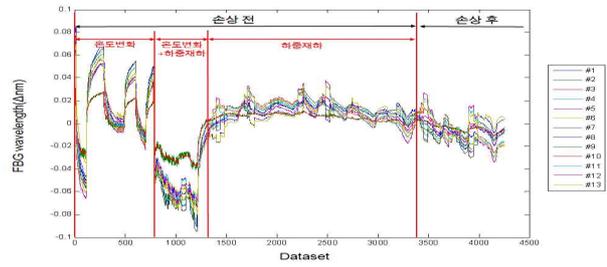


그림 4. 계측 데이터

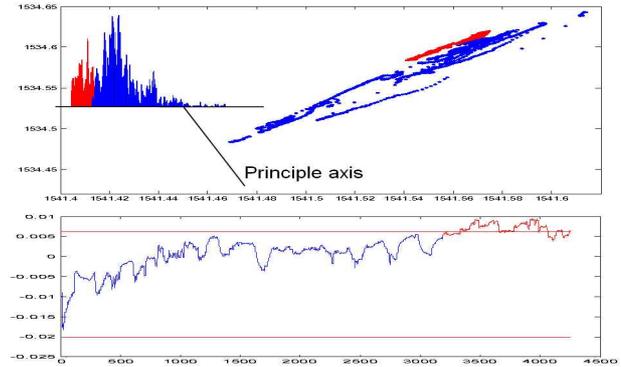


그림 5. 센서 데이터간 상관관계 및 PCA를 통한 손상 검색

그림 4는 각 외부 환경과 손상 전후에 대한 계측 데이터를 보여주고 있다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 구조물의 손상에 의한 계측값의 변화보다 온도 및 하중 조건에 의한 데이터의 변화가 훨씬 심한 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 구조물에 가해진 온도 및 하중에 의한 데이터의 변화를 제거하고, 구조물의 손상에 의한 변화를 나타내기 위해 센서 데이터 간의 상관관계를 확인하였다. 또한 본 상관관계로부터 PCA를 통해 dimension reduction을 위한 principle coefficient index를 구하고 그로부터 baseline을 통해 최종적으로 그림 5와 같은 성공적인 손상 검색을 수행하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 광섬유 FBG 센서를 활용한 조류발전시설물의 건전성 평가 기법을 개발하였다. 이를 위하여 Principle Component Analysis (PCA) 기법을 적용하였으며 이를 검증하기 위하여 1/20 축소모형을 통한 실내 실험을 수행하였고, 구조물의 손상 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 알고리즘을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 R&D 사업인 ‘조류 에너지 실용화 기술개발’ 과제(PM50500)와 한국과학재단 ERC 센터(SISTeC, R11-2002-101-03001-0)의 지원에 의해 수행되었습니다.