잡음 환경 하에서의 전기-역학적 임피던스 기반 조류발전 구조물의 장기 건전성 모니터링

민지영* · 심효진* · 윤정방* · 이진학**

*한국과학기술원 건설 및 환경공학과

**한국해양연구원 연안개발에너지연구부

Impedance-based Long-term Structural Health Monitoring for Tidal Current Power Plant Structure in Noisy Environments

Jiyoung Min*, Hyojin Shim*, Chung-Bang Yun* and Jin-Hak Yi**

*Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

**Coastal Engineering and Ocean Energy Research Department, KORDI, Ansan, Korea

KEY WORDS: Piezoelectric sensors 압전센서, Electro-mechanical impedance 전기-역학적 임피던스, Long-term structural health monitoring 장기 구조물 건전성 모니터링, Noisy environment 잡음 환경, Principal component analysis 주성분 분석.

ABSTRACT: In structural health monitoring (SHM) using electro-mechanical impedance signatures, it is a critical issue for extremely large structures to extract the best damage diagnosis results, while minimizing unknown environmental effects, including temperature, humidity, and acoustic vibration. If the impedance signatures fluctuate because of these factors, these fluctuations should be eliminated because they might hide the characteristics of the host structural damages. This paper presents a long-term SHM technique under an unknown noisy environment for tidal current power plant structures. The obtained impedance signatures contained significant variations during the measurements, especially in the audio frequency range. To eliminate these variations, a continuous principal component analysis was applied, and the results were compared with the conventional approach using the RMSD (Root Mean Square Deviation) and CC (Cross-correlation Coefficient) damage indices. Finally, it was found that this approach could be effectively used for long-term SHM in noisy environments.

1. 서 론

전 세계적으로 신재생 에너지 개발에 대한 관심이 증가하면서, 우리나라에서도 지난 2009년 올돌목에 1 MW급 시험조류발전소를 건설하여 현재 실증실험을 통한 실용화 기술을 개발하고 있다. 올돌목은 최대 13노트의 강한 조류가 발생하는 곳으로 조류 에너지 부존량이 매우 높은 해역이다. 시험조류발전 시스템은 수차, 발전기, 전력변환장치 등의 발전설비와 이를 지지하기 위한 발전설비 지지구조물로 이루어져 있다. 발전설비 지지구조물은 발전설비의 위치를 고정하고 발전설비가 계획대로 동작하게 하기 위한 역할을 수행하며, 조류발전의 효율성, 시공성, 안전성 및 경제성을 고려하여 강관부재로 구성된 재킷 형태로 제작되었다.

한편 조류발전소는 흐름에 따른 조류하중, 해수 및 대기 중의 환경적인 요인, 그리고 주변 통행 선박과의 충돌 등에 의하여 구조물의 변형 및 손상이 발생할 수 있기 때문에 이러한 구조물의 건전성을 상시 감시하고 평가하는 것은 발전시스템 전체의 운영에 있어 매우 중요한 과제가 된다. 현재 올돌목 시험조류발전소 지지구조물의 1/20 축소모형을 제작하여, 지지구조물의 건전성 모니터링에 관한 연구를 수행하고 안전감시 알고리즘을 구축하고 있으며, 이 연구에서는 임피던스 기반의 국부적 손상 모니터링을 수행하고, 대상 구조물이 여러 잡음 환경에 놓여 있다

는 손상을 합리적으로 감시할 수 있는 전기-역학적 임피던스(Electro-mechanical Impedance) 기반 모니터링 기법을 개발하고자 하였다.

2. 전기-역학적 임피던스 기반 구조물 건전성 모니터링

2.1 전기-역학적 임피던스 기반 구조물의 건전성 평가

전기-역학적 임피던스 기반 구조물 건전성 모니터링 기술은 구조물에 소형 압전센서를 부착하여 수 kHz에서 수 MHz 범위의 고주파 영역에서 측정한 전기-역학적 임피던스 신호의 변화를 관찰하는 것에서 출발한다(Giurgiutiu, 2008). 압전센서는 액츄에이터와 센서 기능을 모두 수행할 수 있어 자기 센싱 액츄에이터(Self-sensing actuator)라고도 하며, 압전센서 기반의 모니터링 기술에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있는 토목, 기계, 항공 분야에서는 PZT (Pb-Zr-Ti, Lead zirconate titanate) 센서나 MFC (Macro fiber composite) 센서를 주로 사용한다(Giurgiutiu et al., 1999; Park et al., 2003; Park et al., 2009; Min et al., 2010; Park et al., 2010). Liang et al. (1996)은 압전센서와 구조물에 대한 각각의 전기적, 역학적 임피던스와 이들이 결합된 상태에서의 전기-역학적 임피던스 사이의 관계를 1차원 모델을 이용하여 제안한 바 있으며, 구조물에 부착된 압전센서로부터 획득한 전기-역학적 임피던스 $Z(\omega)$ (어드미턴스(Admittance) $Y(\omega)$ 의 역수)는

식 (1)에서와 같이 구조물과 센서의 역학적 임피던스 $Z_s(\omega)$ 와 $Z_a(\omega)$ 와 직접적으로 연관되어 있음을 제시하였다.

$$\frac{1}{Z(\omega)} = Y(\omega) = G(\omega) + jB(\omega) = j\omega C \left(1 - \kappa_{31}^2 \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} \right) \quad (1)$$

여기서 G 는 어드미턴스 Y 의 실수부인 컨덕턴스(Conductance), B 는 어드미턴스 Y 의 허수부인 서셉턴스(Susceptance), C 는 압전 센서의 zero-load 커패시턴스(Capacitance), 그리고 κ_{31} 은 압전 센서의 전가-역학적 결합계수이다. 식 (1)에서 압전센서의 역학적 임피던스와 재료적·기하학적 특성이 일정할 때, 구조물의 역학적 임피던스 Z_s 가 변화하면 압전센서로부터 계측된 전기적 임피던스 Z 역시 변화한다. 따라서 구조물에 발생한 손상에 의해 구조물의 국부적 질량, 강성, 감쇠특성이 변화할 경우 Z_s 가 달라지므로, 압전센서로부터 계측된 임피던스 신호 Z 를 비교함으로써 구조물의 국부적인 건전성 진단을 수행할 수 있다.

2.2 구조물의 건전성에 대한 정량적 평가

압전센서로부터 계측된 임피던스의 변화를 관찰함으로써 구조물의 건전성에 대한 정성적인 평가를 수행할 수 있으나, 일반적으로 임피던스의 변화를 임의의 손상지수를 사용하여 정량화하여 나타낸다. 일반적으로 사용되는 손상지수는 식 (2)와 식 (3)에서와 같은 제곱평균제곱근편차(Root mean square deviation; RMSD) 지수와 상호상관계수(Cross-correlation coefficient; CC)를 이용한 손상지수로, 식에서와 같이 RMSD 지수의 경우 임피던스 신호의 전체적인 크기 변화에 민감하게 반응하며, CC 지수의 경우 임피던스 신호의 형상 변화에 민감하게 반응한다(Peairs et al., 2006).

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{Re(Z_{i,0}) - Re(Z_{i,1})\}^2}{\sum_{i=1}^n Re(Z_{i,0})^2}} \quad (2)$$

$$CC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{\{Re(Z_{i,0}) - \bar{Z}_0\} \{Re(Z_{i,1}) - \bar{Z}_1\}}{\sigma_{Z_0} \sigma_{Z_1}} \quad (3)$$

여기서 아래첨자 0과 1은 각각 기저(Baseline)상태와 모니터링 중인 공용 상태를 의미하며, i 는 이산화된 i 번째 주파수를 의미한다. 한편, $\bar{Z}_0$ 와 $\bar{Z}_1$ 는 각각 Z_0 와 Z_1 실수부의 평균치이며, σ_{Z_0} 와 σ_{Z_1} 은 각각 Z_0 와 Z_1 실수부의 표준편차이다. 그리고 n 은 분석에 사용된 주파수 성분의 수이다. 위 식에서 알 수 있듯이 두 임피던스 신호 사이의 차이가 커질수록 RMSD 지수는 큰 값을, CC 지수는 작은 값을 가지며, 특히 CC 지수는 -1에서 1사이의 정규화된 값을 가지게 된다. CC 지수의 해양항만구조물에 대한 적용 사례는 이소영 등의 케이션에 대한 손상평가를 위한 연구를 통하여 찾아 볼 수 있다(이소영 등 2009).

임피던스 계측시의 온도 변화는 임피던스 신호에 상당한 영향을 미치며, 잘못된 구조물의 진단을 유발하기도 한다. 따라서 이러한 온도의 영향을 보정하기 위한 다양한 기법들이 제안되었다(Park et al., 1999; Bhalla et al., 2002; Koo et al., 2009). Koo et al. (2009)은 임피던스 신호가 온도변화 때문에 주파수 축을 따라 좌, 우로 이동하는 경향을 보정함으로써 임피던스 신호에 미치는 온도의 영향을 최소화하는 유효주파수 이동법을 제

안하였다. 이 기법은 기준이 되는 기저신호(Baseline; Z_0)와 임의의 임피던스 신호(Z_i)가 최대 CC 값을 가지도록 주파수 축을 따라 Z_i 를 $\tilde{\omega}$ 만큼 이동시키는 것으로, 손상지수는 다음과 같이 정의되며, CC 지수와 마찬가지로 두 임피던스 신호 사이의 차이가 커질수록 CC 값은 감소한다.

$$\max_{\tilde{\omega}} CC = \max_{\tilde{\omega}} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Z_{i,0} - \bar{Z}_0) (Z_{(i-\tilde{\omega}),1} - \bar{Z}_1) \right\} / \sigma_{Z_0} \sigma_{Z_1} \quad (4)$$

여기서 $i_{\tilde{\omega}}$ 는 $i_{\tilde{\omega}} = \tilde{\omega}/df$, df 는 주파수 해상도이다. 이 연구진은 트러스 부재에서의 실험을 통해 온도 변화 때문에 보이지 않았던 구조물의 손상이 maxCC 지수를 통해 효과적으로 탐색될 수 있음을 입증하였다(Koo et al., 2009).

3. 조류발전 구조물의 장기 모니터링

3.1 실험 대상 구조체 및 계측 시스템

울돌목 시험조류발전소 지지구조물의 1/20 축소모형을 Fig. 1에 나타내었다. 이 모형은 그림에서 보는 바와 같이 강관부재로 구성되어 있으며, 직경 76.3mm의 재킷 레그(Jacket leg) 여섯 개(L1~L6)로 지지된다. 각 레그는 구조물 지지대에 볼트로 고정되어 있다. 임피던스를 기반으로 구조물의 국부적 건전성을 모니터링하기 위하여 여섯 개의 MFC 센서를 각 레그의 하부 지지점으로부터 340mm 높이, 즉 아래에서 두 번째 횡방향 부재가 연결되는 지점에 설치하였으며(S1~S6), 한 개의 MFC 센서를 지지점의

Fig. 1 1/20 scale model of Uldolmok tidal current power plan

Fig. 2 The locations of 7 MFC sensors (S1~S7)

볼트 체결부에 부착하였다(S7). 전기-역학적 임피던스를 측정할 수 있는 압전센서로는 PZT, MFC, PVDF (Polyvinylidene fluoride), AFC (Advanced fiber composite) 센서 등이 있으나, 세라믹 소재의 PZT 센서와 달리 유연성이 있어 곡면에 대한 적용이 용이하고 PVDF 센서보다 신호가 큰 MFC 센서를 사용하였다. 한편 MFC 센서와 유사한 AFC 센서의 경우 MFC 센서와 유사한 성능을 가진 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 사용하지 않았다. 7개의 MFC 센서는 멀티플렉서(Agilent 34980A)를 통해 임피던스 측정기(Agilent 4294A)에 연결되며, 설정해 놓은 시간에 S1부터 S7까지 순차적으로 10-30kHz 구간의 임피던스를 자동 계측한다(Fig. 3). 이 연구에서는 60 분 간격으로 총 10 일 동안 모니터링을 실시하였으며, 하나의 센서로부터 임피던스를 측정하는데 걸리는 시간은 약 15초로, 7개의 센서에 대한 임피던스 자료를 얻는데 2분 미만의 시간이 소요되었다. 한편, 구조물에서 약 1.5m 떨어진 곳에 설치된 에어컨을 항상 가동시켜 실험실의 실내 온도가 $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 로 유지되도록 하였다.

Fig. 3 Impedance measurement system

3.2 손상 시나리오

조류발전소는 매우 큰 조류하중에 노출되어 있으며, 통행 선박과의 충돌로 인해 심각한 손상을 입을 가능성이 있다. 또한 시공 시에도 높은 조류속으로 인하여 신뢰성 높은 정밀시공이 어렵기 때문에 사용 중 안전성 확보 여부가 매우 중요하다. 특히 구조물 하부 접합부의 경우 매우 큰 모멘트가 발생하여 국부적인 손상 발생 가능성이 높은 파괴유발부재(Failure critical member) 중의 하나이기도 하다. 따라서 이러한 파괴유발부재에 대한 지속적인 국부 손상 모니터링은 전체 구조물 시스템의 유지관리에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 실험에서는 Table 1과 같이 지지부 볼트 체결이 느슨해진 경우와 강관 부재 용접부에 손상이 발생하여 부재가 이탈한 경우에 인근에 부착되어 있는 MFC 센서가 장기간 모니터링 과정 중 이러한 손상을 탐색할 수 있는 지를 살펴보았다. 실제 시험조류발전 구조물의 환경을 최대한 모사하기 위하여 구조물에 비해 매우 작은 28mm x 14mm 크기의 MFC 센서를 사용하였고, 멀티플렉서와 MFC 센서를 약 2m의 전선으로 연결하였으며, 항상 가동 중인 에어컨이 구조물에 진동을 유발하도록 하였다. 여기에서 전선은 계측 시스템에 추가적인 저항으로 작용하기 때문에 임피던스의 크기에 영향을 줄 수 있으나 한 번 설치해 놓은 상태에서는 일정한 임피던스 값을 가지므로 임피던스 신호의 상대적인 변화를 관찰하는 임피던스 기법의 진단 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다. 또한 에어컨에

의한 진동 및 소음은 미소 진동으로, 상시 파랑에 의한 구조물 진동과 기계 등의 운용에 의해 발생하는 소음 등 실제 구조물에서의 전기-역학적 임피던스에 영향을 줄 수 있는 다양한 잡음환경을 모사하고 있다.

Table 1 Damage scenarios

	Baseline	Damage 1	Damage 2	Damage 3	Damage 4
Description	No damages	Loose 1 bolt at L1 bolt Joint	50% cut a brace at L6	50% cut a brace at L3	100% cut a brace at L3
Measurement (Days)	4.08	1.17	0.83	2.42	1.29
No. Data (Sets)	98	28	20	58	31

3.3 기존 기법을 이용한 구조물의 실시간 모니터링

우선 손상이 없을 때 7개의 센서로부터 약 4일간 98세트의 임피던스 신호를 획득하였다. 강관부재에 부착된 센서 S3과 평판부재에 부착된 S7에서 획득한 임피던스 신호 실수부의 예를 Fig. 4에 도시하였다. S3의 경우 S7에 비해 신호의 변화량(Variation)이 크며 신호의 피크(Peak)가 확연하게 드러나지 않는데, 이는 강관부재의 경우 센서에 비해 구조물의 크기가 큰데다 무한 경계조건을 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 본 논문에서 사용한 주파수 대역은 가청 주파수 대역(보통 20 Hz~20 kHz)을 포함하고 있기 때문에 주변 소음 진동에 반응한다. 이러한 실험 환경적 요인들에 의하여 임피던스 신호에는 잡음이 포함되며, 동일한 손상 조건임에도 불구하고 신호에 변화가 발생한다.

(a) Sensor No. 3 (S3)

(b) Sensor No. 7 (S7)

Fig. 4 Impedance signatures obtained from sensors 3 and 7

모니터링 시작 후 5일째에 재킷 레그 L1 지지점의 볼트 체결부에 위치한 볼트 하나를 초기 토크 1280N·m에서 600N·m이 되도록 느슨하게 풀었다. 이는 장기간 사용에 따른 지반 강성 감소를 이상화한 손상 조건으로 고려할 수 있다. 약 1일간 각 센서로부터 28 트의 임피던스 신호를 획득하였다. Fig. 5는 볼트 체결부 인근에 위치한 S7의 손상 전 후 임피던스 신호를 16-23kHz 대역만 확대하여 나타낸 것이다. 예상했던 바와 같이 손상에 의하여 기존의 피크가 이동하고 크기가 변하였으며, 새로운 피크도 발생하였다. 이후 재킷 레그 L6의 하부 지지점으로부터 680mm 떨어진 곳에 위치한 대각부재의 용접부를 50% 절단한 후, 약 1 일 동안 20세트의 신호를 획득하였다. 손상으로 부터 340mm 거리에 위치한 센서 S6의 손상에 의한 신호 변화를 Fig. 6에 도시하였으며, 손상에 의한 변화를 명확하게 확인할 수 있도록 10-15kHz 구간을 확대하였다. 그러나 지지부에서의 볼트를 일부 풀었을 때의 센서 S7에서의 임피던스 변화와는 달리 손상에 따른 임피던스 신호 자체의 변화가 명확하게 드러나지 않고 단지 서브 피크들이 변화하였다. 마지막으로 재킷 레그 L3의 하부 지지점으로부터 340mm 떨어진 곳에 위치한 대각부재의 용접부를 50%, 100%만큼 차례로 절단하였다. 50% 절단 후 약 5일간 모니터링 하여 각 센서로부터 89 세트의 임피던스 신호를 획득하였다. 절단부에서 50mm 떨어진 센서 S3의 임피던스 신호가 손상에 의해 변화하는 경향을 Fig. 7에 나타내었다. 평판부재에 부착된 센서 S7의 신호와는 달리 강관부재에 부착된 센서 S3의 신호는 피크의 변화보다는 전체적인 기울기 및 서브 피크의 변화가 두드러지게 나타난다.

Fig. 5 Impedance signatures on healthy and damaged conditions measured by S7

Fig. 6 Impedance signatures on healthy and damaged conditions measured by S6

Fig. 7 Impedance signatures on healthy and damaged conditions measured by S3

구조물 모니터링 중 각 센서로부터 임피던스 신호를 획득하고, 이를 식 (3)에 대입하여 CC 지수를 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 CC 지수는 전술한 바와 같이 1에서 -1 사이의 값을 가지며 손상이 없을 경우 1의 값을 가지게 되어, 이 연구에서는 RMSD 지수와 비교 편의를 위하여 CC 지수 대신 1-CC 지수를 사용하였다. Fig. 8은 모니터링 중 각 센서로부터 획득된 RMSD 지수와 1-CC 지수를 도시한 것이다. 그림에서 수직 점선은 손상이 가해진 시점을 의미한다. RMSD와 CC 지수는 공통적으로 값의 변동이 심하게 발생하며, 특히 RMSD 지수는 이러한 값의 변동으로 인하여 볼트 체결부 손상만을 탐색할 수 있는 것으로 판단되었다. 즉, 잡음 환경 하 동일 손상 조건에서도 임피던스 신호가 변동하는 본 실험의 결과에는 RMSD 지수의 적용이 적합하지 않음을 알 수 있다. 반면 1-CC 지수는 볼트 체결부 손상 및 재킷 레그 L3에 가해진 손상을 성공적으로 탐색한 것으로 판단할 수 있으나, 전체적으로 CC 지수의 변동이 심해 명확한 손상 진단이 어려운 것으로 사료된다. 이와 같이 변동이 심한 손상지수를 모니터링 하여 손상 발생 여부를 판단하는 것은 오진율을 높일 뿐만 아니라, 결과의 신뢰성 역시 떨어뜨리는 단점을 가지고 있다. 따라서 실험 환경에 의한 신호 잡음 효과를 줄이고, 대형 구조물의 모니터링에서 발생할 수 있는 임피던스 신호 내 피크의 부재를 보완하는 기술을 개발함으로써, 장기간 구조물 모니터링에 적합하도록 임피던스 측정 및 진단 시스템을 보완해야 할 것이다.

Fig. 8 Conventional damage indices for structural health monitoring

4. 주성분 분석을 이용한 구조물의 실시간 모니터링

4.1 주성분 분석(Principal component analysis; PCA)

주성분 분석은 일반적으로 데이터의 차원을 축소시키고 불필요한 정보를 제거하기 위해 사용되는 다변량 통계분석의 고전적인

기법이다(Krzanowski, 2000). 이 기법은 여러 개의 데이터 셋(벡터)들로 이루어진 다차원 공간으로부터 차원해석을 통해 소수의 주된 독립 좌표계를 구한 뒤 원래 데이터 셋을 이 좌표계로 투영하여 분석한다. 서로 연관되어 있는 벡터들로부터 상관성이 없는 벡터들을 추출하여 사용하는 것이 주된 특성을 이해하기 쉬운 뿐만 아니라 추후 분석에 활용하기에도 수월하기 때문에 이러한 분석 기법은 공학, 생물학, 화학, 기상학, 지질학, 행동 및 사회과학 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다(Park et al., 2007).

M 회 측정된 임피던스 데이터가 $\{x_i\}(i=1,2,\dots,M)$ 이고, 이 데이터의 공분산 행렬이 $[C]$ 일 때, 우선 $[C]$ 의 특이치 분해(Singular value decomposition)를 수행한다. $[A]$ 가 $[C]$ 의 특이행렬(주성분 행렬)이고, $[A]$ 가 고유치 대각행렬일 때 주성분인 $\{z\}$ 는 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$[C] = [A][A]^T; \{z\}_j = [A]^T(\{x\}_j - \{\bar{x}\}) \quad (5)$$

주성분을 통해 임피던스 데이터(행렬)의 N 개의 주성분으로의 투영행렬인 $[H(\omega)]_{M \times N}$ 은 다음과 같이 구한다.

$$[B]_{M \times N} = [H(\omega)]_{M \times N} [A]_{N \times N} \quad (6)$$

투영행렬 $[B]$ 와 주성분행렬 $[A]$ 는 중요한 P 개의 주성분과 그렇지 않은 $N-P$ 개의 주성분으로 구성된 두 개의 하위 행렬로 나눌 수 있으며, 다음과 같이 P 개의 주성분만을 이용하여 $[H_R]$ 로 복원할 수 있다.

$$[B]_{M \times N} = [[B_1]_{M \times P}; [B_2]_{M \times (N-P)}] \quad (7)$$

$$[A]_{N \times N} = [[A_1]_{N \times P}; [A_2]_{N \times (N-P)}] \quad (8)$$

$$[H_R] = [B][A]^T \cong [B_1]_{M \times P} [A_1]_{N \times P}^T \quad (9)$$

Park et al. (2007)은 주성분 분석을 통해 복원된 임피던스 신호를 사용하였을 때 잡음 제거 효과로 인해 손상 탐색이 효과적으로 이루어짐을 보여주었다.

4.2 주성분 분석을 이용한 구조물 실시간 모니터링

본 연구에서는 주성분 분석을 구조물의 장기 실시간 모니터링에 적합하도록 접근 방법을 보완하고, 이를 시험조류발전소 지지구조물의 축소모델의 모니터링에 적용해 보았다. 장기 모니터링은 임피던스 신호가 계속될 때마다 각 신호에 해당하는 손상지수를 계산하여 관리자가 쉽게 구조물의 상태를 이해할 수 있도록 도시는 것이 효과적이다. 그러나 Fig. 8과 같은 손상지수는 앞서 언급하였듯이 심한 변동으로 인해 오진율을 높일 수 있다. 일반적으로 임피던스 신호를 이용한 주성분 분석 기법은 수십 개의 데이터 셋을 획득한 후 일부의 주성분만을 통해 복원된 임피던스 신호로부터 손상지수를 계산한다. 그러나 이 경우 데이터 셋을 획득하기 위한 추가적인 측정 시간을 필요로 하기 때문에 장기 실시간 모니터링에는 적합하지 않다. 따라서 Fig. 9와 같이 계속 데이터가 하나씩 추가될 때마다 이전 데이터와 셋을 이루어 주성분 분석을 수행하게 되면 측정 시간을 절약하고 신호에 포함되어 있는 불필요한 성분들을 제거함으로써 잡음 제거에도 효과적이다.

우선 손상이 없는 경우 첫 20개의 데이터를 이용하여 주성분 분석을 수행하였다. 센서 S1로부터 획득된 임피던스 신호의 주성분 분석을 통해 추출된 20개의 주성분들이 신호에 미치는 기여도의 예를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보듯이 첫 번째 주

성분이 약 94%로 가장 큰 영향을 끼치고 있으며, 두 번째 주성분이 약 5.6%, 나머지 주성분들이 0.0025% 등으로 신호에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다. 이러한 경향은 모든 센서들에서 동일하게 나타났으며, 따라서 첫 번째 주성분과 두 번째 주성분만을 이용하여 신호를 복원하기로 결정하였다.

Fig. 9 Continuous SHM using PCA

Fig. 10 Contribution of each PC on impedance signature obtained from S1

Fig. 11은 센서 S1에서 무손상 상태에서 획득된 임피던스 신호와 주성분 분석을 통해 복원된 임피던스 신호를 비교한 그림이다. 그림에서 보듯이 서브 피크들의 변동이 현저하게 감소하면서 주요 피크가 명확히 드러남을 알 수 있다. 이렇게 복원된 임피던스 신호를 이용하여 1-CC 손상지수를 계산하였다. 신호 특성상 신호 내 피크의 영향보다 경향의 영향이 크기 때문에 RMSD 지수보다 1-CC 지수가 적합하다는 것을 Fig. 8에서 보여준 바 있다.

Fig. 11 Comparison of raw and reconstructed impedance signatures

이후 21번째 데이터가 추가되었을 때 2~21번째 데이터를 이용하여 주성분 분석을 수행하였으며, 마찬가지로 첫 번째와 두 번째 주성분을 이용하여 임피던스 신호를 복원한 뒤 1-CC 손상지수를 계산하였다. 이와 같이 데이터가 하나씩 추가될 때마다 주성분 분석으로 복원된 신호를 이용하여 손상지수를 계산한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 손상이 가해진 부재에 부착되어

있는 센서의 결과를 굵은 선으로, 손상이 가해진 시점을 수직 점선으로 표현하였다.

Fig. 12 1-CC index using reconstructed impedance signatures by PCA

Fig. 8(b)와 Fig. 12를 비교할 때 일반적인 1-CC 지수는 환경적 요인으로 신호에 포함되어 있는 잡음 성분 등에 의해 변동이 크게 발생하면서 손상의 진단에 어려움이 있었던 반면, 이전에 획득된 데이터와의 주성분 분석을 통해 복원된 신호를 이용한 경우 그 변동이 감소하면서 손상을 효과적으로 탐색함을 알 수 있다. 일부 센서의 경우 무손상일 때 1-CC 지수가 점차적으로 증가하며 손상을 나타내기도 하였으나, 이후 다시 감소함으로써 손상이 아님을 보여주었다. 이를 통한 구조물에 대한 잘못된 손상진단을 방지하기 위해서는 모니터링을 시작할 때 충분한 데이터를 획득하여 신호 및 손상지수의 분산을 확인하는 것이 필요함을 알 수 있다.

4.3 경계치(Threshold Value) 업데이트를 통한 구조물 손상 진단

장기 모니터링을 통해 임의의 시기에 발생한 손상을 탐색하기 위해서는 미리 결정된 경계치에 비해 1-CC 지수가 커질 때 이를 감지하고 경고할 수 있어야 한다. 일반적으로 무손상 상태의 손상지수가 정규분포를 따른다고 가정하고 손상지수의 99 % 신뢰구간 상한(경계치= $\mu + 2.58\sigma$)을 결정한 뒤, 이 구간을 벗어나면 손상으로 진단한다. 그러나 모니터링 과정 중 예측치 못한 구조물 조건(하중, 온도 등)의 변화로 인해 신뢰구간이 변화할 수 있기 때문에 지속적으로 업데이트를 해야 한다.

본 연구에서 제안하는 99% 신뢰구간 기반 경계치 업데이트 과정은 다음과 같다. i 번째 손상지수 $DI(i)$ 와 $i-1$ 번째까지 데이터를 통해 계산된 경계치 $thr(i-1)$ 을 비교하였을 때 (1) $thr(i-1) \geq DI(i)$ 이면 $thr(i) = thr(i-1)$ 이고, (2) $thr(i-1) \leq DI(i)$ 이면 $DI(i)$ 를 이용하여 경계치를 새로 업데이트한다. 이렇게 업데이트 된 경계치 $thr(i)$ 가 $DI(i) \leq thr(i)$ 이면 이상이 없는 것으로, $DI(i) > thr(i)$ 이면 손상으로 판단하고 이 경계치를 계속 고정시키고 추이를 살펴본다. 단, 신호의 변동성을 고려하여 이 경계치에 5%의 오차범위를 두었다. $thr^*(i) = thr(i) \times 1.05$. Fig. 13은 손상 인근에 위치한 센서 S3과 S6의 손상 모니터링 결과이다. 좌측은 기존의 기법, 우측은 주성분 분석에 기반을 둔 기법의 결과로 실선은 1-CC 지수를, 점선은 경계치를 나타낸다. 기존의 1-CC 지수의 경우 레그 L6에 발생한 손상(Damage 2)은 탐색하지 못하였고, 레그 L3에 발생한 50% 손상(Damage 3)은 제때에 탐색하였다. 반면 주성분 분석

(a) Conventional method from S6
(Estimated: No damage)

(b) Continuous PCA method from S6
(Estimated: Damage at data #116)

(c) Conventional method from S3
(Estimated: Damage at data #144)

(d) Continuous PCA method from S3
(Estimated: Damage at data #153)

Fig. 13 Continuously updated threshold values for long-term damage diagnosis

기반 1-CC 지수는 모든 손상을 정확하게 탐색함으로써 제안된 주성분 분석 기반 장기 모니터링 및 경계치 업데이트 기법이 구조물의 실시간 손상 탐색에 효과적임을 입증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 울돌목 시험조류발전소 지지구조물의 1/20 축소모형의 임피던스 기반 국부적 모니터링에 관한 연구를 수행하였다. 대상 구조물이 압전센서에 비해 매우 크고 무한 경계조건이며 잡음 환경에 놓여있는 경우 기존의 임피던스 기반 모니터링 기법은 구조물의 상태를 오진할 확률이 높게 나타났다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위하여 연속적인 주성분 분석을 통해 신호의 주요 정보만을 추출하여 모니터링 하였으며, 그 결과 오진 확률이 감소하고 손상을 효과적으로 탐색함을 알 수 있었다. 또한 손상을 적시에 탐색하기 위하여 경계치 업데이트 기법도 함께 소개하였다. 후속 연구로써 온도 변화 및 조류하중을 모사한 횡하중이 구조물에 작용할 때 이러한 영향을 최소화할 수 있는 임피던스 신호처리 기법에 관한 연구를 수행하여 실제 구조물에서의 적용성을 판단할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 R&D 사업인 조류 에너지 실용화 기술개발 과제(PM55500)와 U-city 석·박사과정 지원사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

이소영, 김정태, 김현태, 박우선 (2009). "가속도 계측을 통한 항만 시설용 케이슨 구조체의 동적응답 분석", 한국해양공학회지, 제23권 제1호, pp 114-121.

Bhalla, S., Naidu, A.S.K. and Soh, C.K. (2002). "Influence of Structure-actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE", ISSS-SPIE Int'l Conferences on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore.

Giurgiutiu, V., Reynolds, A. and Rogers, C.A. (1999). "Experimental Investigation of E/M Impedance Health Monitoring of Spot-welded Structure Joints", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol 10, pp 802-812.

Giurgiutiu, V. (2008). Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors, Academic Press, USA, pp 363-434.

Krzanowski, W.J. (2000). Principals of Multivariate Analysis-A User's Perspective, Revised Edition, Oxford University, Press, Oxford.

Koo, K. Y., Park, S., Lee, J. -J., and Yun, C. -B. (2009). "Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol 20, pp 367-377.

Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A. (1996). "Electro-mechanical Impedance Modeling of Active Material Systems", Smart Materials and Structures, Vol 5, pp 171-186.

Min, J., Park, S., Yun, C.B. and Song, B. (2010). "Development of a Low-cost Multifunctional Wireless Impedance Sensor Node", Smart Structures and Systems, Vol 6, No 5-6, pp 689-709.

Park, G., Kabeya, K., Cudney, H. H. and Inman, D. (1999). "Impedance-based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications", JSME International Journal Series A, Vol 42, pp 249-258.

Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R. and Inman, D.J. (2003). "Overview of Piezoelectric Impedance-based Health Monitoring and Path Forward", Shock Vibration Digest, Vol 35, pp 451-463.

Park, J.H., Lee, S.Y., Kim, J.T. (2010). "Development of Acceleration-PZT Impedance Hybrid Sensor Nodes Embedding Damage Identification Algorithm for PSC Girders", 한국해양공학회지, 제24권 제3호, pp 1-10.

Park, S., Lee, J.J., Inman, D.J. and Yun, C.B. (2007). "Electro-mechanical Impedance-based Wireless Structural Health Monitoring Using PCA and k-means Clustering Algorithm", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol 19, pp 509-520.

Park, S., Shin, H.-H. and Yun, C.B. (2009). "Wireless impedance sensor nodes for functions of structural damage identification and sensor self-diagnosis", Smart Materials and Structures, Vol 18, pp 1-11.

Peairs, D.M., Tarazaga, P.A. and Inman, D.J. (2006). "A study of the Correlation between PZT and MFC Resonance Peaks and Damage Detection Frequency Intervals Using the Impedance Method", International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.

2010년 12월 3일 원고 접수

2011년 7월 8일 심사 완료

2011년 8월 16일 게재 확정