

해상풍력터빈의 원격검사 방법과 그 효과 분석

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 나덕주
(djra15@reseat.re.kr)

1. 서언

- 해상풍력터빈의 이점은 거주 지역에서 멀리 떨어지고 더 좋은 바람의 조건을 가지고 있는 넓은 장소에 설치 가능하다는 점이다. 그러나 해상 풍력에너지를 설치, 기반시설 및 정비측면에서 육상풍력터빈보다 더 많은 비용이 소요되기 때문에 향후 보조금 지원을 받지 않도록 에너지 비용을 감축하는 것이 중요한 이슈로 대두되고 있다.
- 해상풍력터빈의 정비비용은 전체 에너지 비용 중 약 20~25%로 육상 풍력터빈보다 훨씬 많이 소요된다. 풍력터빈의 정비 업무는 안전을 위해 2명의 엔지니어를 파견하는 것을 포함하여 매년 몇 차례 각 터빈을 방문하여 점검하는 활동이다. 터빈에 접근하는 것은 대단히 어렵고 위험하다. 특히 파고가 2.5m 이상이 되면 접근하는 것이 불가능하고, 북해의 경우 이런 날씨가 연중 절반 이상이다. 겨울에는 터빈에 문제가 생기면 장기간 접근이 불가능하여 운전정지 상태가 오래 지속된다.
- 본문은 기존의 사람에 의한 풍력터빈 검사 대신에 원격으로 검사하는 방법을 제시한다. 즉 지상에 있는 검사자 대신에 터빈 나셀에 설치된 로봇을 사용하여 검사를 수행한다. 이 로봇은 카메라, 마이크처럼 인간과 유사한 감각을 사용하여 정보를 획득한다. 이는 상태감시의 대안이나 자동 시스템을 의미하는 것이 아니고 날씨가 나빠도 터빈에 접근하지 않고 저비용으로 검사자의 경험을 동원할 수 있다는 뜻이다.

2. 검사자 검사와 원격검사의 실험적 비교

- 검사자 검사와 원격검사의 비교 실험 준비: 검사를 위한 실험실을 건설하였다. 실험실 안에 해상풍력터빈 나셀의 목업을 준비하고, 원격 및

검사자 검사에서 발견될 수 있는 오류 확률을 비교할 수 있는 관찰용 장비를 준비하였다. 실험실에서는 많은 참가자와 모든 장비의 완전한 제어를 활용하여 평가하고, 좀 더 실제적 환경 하에서의 검증을 위해 실제 풍력터빈에서 시험을 추가하였다.

- 이 실험의 목적은 장비에 내재한 오류 및 문제점에 관한 대상을 검출하기 위하여 참가자의 능력을 측정하는 것이다. 이는 검사하는 동안 발견되는 검출대상물의 비율, 즉 검사방법의 효율성을 의미하는 검출률로 측정하고, 12개의 오류 표시와 16개의 클립으로 정의한다.
- 오류 표시는 실제 장비에서 발견되는 오류를 모방하여 만들고, 경험 있는 참가자들이 식별할 수 있고 검사하는 동안 추가하거나 제거할 수 있도록 최대한 실제와 유사하게 설계하였다. 클립은 결함의 징후로 보이는 오류를 나타내며 A에서 D까지 4개의 그룹으로 표시한다. 각 그룹은 이전 실험에서의 경험을 바탕으로 유사한 난이도를 갖도록 설계하고, 각 오류 표시는 4개의 클립으로 구성한다.
- 실험실 평가를 위한 로봇: 실험실 평가를 위해 개발된 로봇은 터빈에서 사용할 수 있을 정도로 신뢰성 있고 튼튼하지는 않고, 향후 신뢰성 있고 싼 비용으로 구현할 수 있도록 단순하게 설계하고, 로봇에 내장 컴퓨터는 ARM 기반 Beaglebone 보드를 사용하였다.
- 풍력터빈 나셀과 같이 밀폐된 공간 안에서 검사하는 장점을 고려하여 로봇은 레일을 따라 이동한다. 로봇을 바닥으로부터 들어 올려 검사할 장비에 근접시키는 것은 어렵지 않다. 자유롭게 기어 올라가는 로봇은 대단히 복잡하고, 비싸고 또 신뢰도가 떨어진다. 레일을 따라 움직이기 때문에 정확한 위치를 유지할 수 있고, 로봇이 떨어지지 않도록 레일에 꼭 밀착시켜 다른 장비나 로봇을 손상시키지 않는 장점이 있다.
- 사용자 인터페이스는 Java 응용소프트웨어를 사용하여 로봇에 클라이언트로 연결하고, 24인치 모니터를 사용한다. 카메라에서 수집한 영상은 검사하는 동안 중요한 정보로 제공된다. 로봇제어 인터페이스용 터치스크린은 삼성 갤럭시 10.1 태블릿을 사용하였다. 로봇은 swipe라고 부르는 접촉 동작을 하며 미리 지정된 위치 사이를 이동한다. 이 로봇

제어는 비록 다른 로봇보다 단순하지만 레일 위를 움직이기 때문에 더 높은 자율주행이 가능하고, 또한 작업부하를 줄이고, 효율이 좋고, 사용자로 하여금 사용하기 쉬운 장점이 있다.

- 실험실 안에 대상물의 위치에 관계없이 실험을 위한 위치를 미리 정하고, 실험 중 관찰 가능하도록 장비의 위치를 결정한다. 매 실험마다 로봇은 똑 같은 위치로 움직이므로 과거 정보를 저장하는 것이 어렵지 않다. 인터페이스에 의해 사용자가 미리 정해진 위치 주위를 따라 수동으로 로봇을 제어할 수 있다.
- 제어 인터페이스에 추가로 2차 스크린으로 태블릿을 사용하여 부가적인 내용을 사용자에게 제공한다. 이는 Nintendo 및 스마트 폰의 터치 스크린처럼 최신 게임 콘솔 개념과 비슷하다. 태블릿에는 3개의 장면을 보여 준다. 첫째는 로봇 환경의 지도 장면, 둘째는 로봇 위치의 기록 영상, 셋째는 위 영상에 과거와 현재의 영상 차이를 나타내는 이미지 분석 알고리즘을 추가한다.
- 실험은 노르웨이 과기대에서 31명의 학생이 참가하여 2주에 걸쳐 수행하였다. 한 학생은 과거에 유사한 실험에 참가한 경험이 있고 나머지는 최초로 본 실험에 참가하였다. 각 참가자는 2번은 사람이 직접, 다른 2번은 원격검사를 합해 총 4번의 검사를 실시하였다. 수동 검사에는 3분이 주어졌고 과거 실험을 탐구할 수 있도록 충분한 시간을 주었다. 원격검사는 더 많은 시간이 소요되므로 5분이 주어졌다.
- 매 실험마다 4개 그룹의 대상물 중 하나를 나타내고, 모든 참가자는 서로 다른 순서에 따라 한 그룹에 대해 하나의 검사를 수행하였다. 학습 효과의 균형을 맞추기 위하여 참가자의 절반은 원격 1번과 3번의 검사를 수행하고, 다른 절반은 2번과 4번의 검사를 수행하였다. 각 참가자는 약 45분을 사용하였다.
- 참가자들은 실험에 대한 정보를 얻기 위해 미리 준비된 대본을 읽고, 마모, 손상, 부품의 누락 등과 같은 징후를 명백하게 인지할 경우 오류 표시로 기술하였다. 다음에 참가자들은 배후 정보를 탐구하였다. 각 참가자들에 대해 오류 표시와 클립의 검출률을 측정하였다. 매번 검사가

끝나면 NASA-TLX 분석 방법을 사용하여 0에서 100까지 눈금이 매겨진 6개 등급의 운전자 부하를 평가하였다. 평가 값이 높으면 작업 부하가 높다는 것을 의미한다.

- 30명의 참가자들이 각각 4번 검사하여 총 120개의 검사를 수행하였다. 로봇이 움직여 카메라를 조정할 때까지 각 참가자가 기다린 시간은 평균 72초로서 이는 각 참가자가 로봇을 작동시켜 움직이는 데 걸린 시간을 측정한 것이다. 원격검사를 위해 미리 정해진 위치를 찾아가는 횟수를 기록하였다. 18개 위치 중 90%를 찾았고, 오직 42%의 참가자만이 18개 전체를 찾을 수 있었다.
- 사람이 직접 검사하는 것보다 원격으로 검사하는 것이 훨씬 어렵고, 원격검사의 경우 검사방법에 따른 효과의 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 대부분의 참가자들이 원격 검사를 완수하기 전에 많은 시간을 사용하고 참가자의 절반만이 주어진 시간 안에 모든 결함 위치를 찾을 수 있는 점을 볼 때, 가용한 시간이 충분하다면 이 두 가지 방법 사이에 차이는 별로 없다고 판단된다.
- 원격검사가 약 120초 더 소요되고, 로봇이 움직이는 시간을 제외한 유효 검사시간만을 고려해도 약 48초 더 걸리는 것으로 나타났다. 원격검사 시간이 더 소요되는 것을 인정해도 원격검사 시스템을 개선할 필요가 있다. 예로 카메라 특성 중 비슷한 색상을 구별하는 능력을 개선하면 카메라 영상으로부터 오류를 인지하는 것이 가능할 것이다.

3. 원격 검사 능력의 평가

- 본 실험은 카메라를 사용하여 영상검사를 수행하는 한 가지 방법으로 평가하였다. 그러나 원격검사를 수행하는 데는 온도기록 카메라, 진동 센서, 마이크 등을 사용하는 다른 방법도 가능하다. 그러나 실험실에서 열, 음향 및 진동을 재현하는 것은 대단히 어렵기 때문에, 영상을 제외한 모든 다른 방법은 이 실험에 포함하지 않았다. 이것을 평가하려면 실제 풍력터빈에서 운영 실험을 해 봐야 하기 때문이다.
- 풍력터빈의 원격검사에서 발생할 수 있는 문제점은 검사자 검사에서

식별될 수 있는 오류가 원격검사에서는 식별하기 어렵다는 점이다. 예로 로봇은 잘 보이는 위치로 이동하는 것이 어렵거나 불가능하다는 점 등 여러 가지 이유가 있다. 로봇을 움직이는 데 레일을 사용한다면 터빈 모델에 따라 나셀 내부가 달라져야 한다는 뜻이다.

- 또 로봇의 센서로 오류가 검출되지 않을 수 있다. 이 실험에서도 오류 표시 중 하나는 카메라로 검출하기 대단히 어려웠다. 필드 테스트에서 센서는 실제 환경 조건에서 시험하고, 센서의 품질과 또 원하는 대로 관찰할 수 있는가를 평가하는 것이 가능하다. 센서 정보를 저장했다가 이를 분석하기 위하여 추후 재생할 수 있다.
- 그러나 필드 테스트에는 문제가 있다. 풍력터빈의 파괴에 큰 관심이 있지만 이를 미리 측정하고 예측하는 것은 아주 어렵다. CleverFarm 프로젝트의 경우 3대의 터빈에 상태추적 시스템을 장착했는데 3년 반 동안 아무런 파괴도 발생하지 않았다. 따라서 상태추적 방법에 의해 파괴를 예측하는 것은 가능하지 않다. 마찬가지로 거의 파괴가 일어나지 않는다면 원격검사에 의해 실제 파괴를 예측하는 것은 어렵다.

4. 결론

- 본문에 검사자 검사의 대안으로 원격검사를 사용하는 방법을 제시하였다. 해상풍력 터빈을 방문하여 정비 업무를 수행하려면 많은 비용이 들기 때문에 원격검사를 적용하여 비용을 크게 줄일 수 있고, 총 소요 시간도 단축할 수 있다. 이 시스템은 실험실 환경에서 수행하였기 때문에 실제 풍력터빈에서 어떻게 작동하는지를 평가한 것은 아니다. 실제 환경 하에서 유효한가를 평가하기 위하여 터빈 나셀 내에서 필드 시험할 것을 제안한다.

출처 : Øyvind Netland, Gunnar D. Jenssen, Amund Skavhaug, "The Capabilities and Effectiveness of Remote Inspection of Wind Turbines", *Energy Procedia*, 80, 2015, pp.177~184

◁ 전문가 제언 ▷

- 풍력발전은 매년 20~30%씩 성장하고 있고, 미국은 2030년에 총 전기의 20%를 풍력에서 조달할 전망이다. 해상풍력산업은 현재 평균 투자비용이 3,000유로/kW 정도로 평가되고 2020년에는 1,500유로/kW 수준으로 감소할 전망이다. 대표적인 2MW 풍력터빈의 운전 정비비용은 750kW급 풍력터빈 프로젝트 비용의 88% 수준이다.
- 해상풍력터빈의 정비비용은 전체 에너지 비용 중 약 20~25%로 육상 풍력터빈보다 훨씬 많이 소요된다. 파고가 2.5m 이상이 되면 터빈에 접근하는 것은 대단히 어렵고 위험하다. 터빈에 문제가 생겨 장기간 접근이 불가능하면 운전정지 상태가 오래 지속되기 때문에 기존의 사람이 수행하는 풍력터빈의 검사를 원격으로 검사할 필요가 있다.
- 본문은 풍력터빈에서 원격검사 방법을 제시하고 그 효율성을 파악하기 위해 로봇형상을 가진 원격검사와 검사자 검사 두 방법을 비교 평가하였다. 31명의 참가자가 로봇을 이용하거나 이용하지 않는 두 가지 조건으로 실시하였다. 원격검사는 검사자 검사만큼 우수하지 않았으며, 그 차이는 별로 크지 않고 충분히 개선 가능하다고 판단하였다.
- 원격검사에는 온도기록 카메라, 진동 센서, 마이크 등을 사용하는데, 실험실에서 열, 음향 및 진동을 재현하는 것이 어렵기 때문에 영상 방법만을 적용하였다. 원격검사가 약 120초 더 소요되고 유효 검사시간만을 고려해도 약 48초 더 걸린다. 원격검사 시간이 더 소요되는 것을 인정해도 원격검사 시스템을 개선할 필요가 있다.
- 우리나라도 2020년까지 서해에 2.5GW의 해상풍력발전 단지를 건설하고 있는데 풍력터빈의 대형화와 함께 신뢰성 확보 문제가 대두됨에 따라 접근성이 좋지 않은 해상 풍력의 경우 반드시 원격검사 및 감시시스템이 필요하다. 국내에서 개발한 풍력발전 무인 원격감시시스템은 영흥 국산풍력 Test Bed를 대상으로 2010년 5월 설치 및 적용되어 2달간의 시운전 기간을 거친 후 성공적으로 운영되고 있다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.