

해상풍력 구조물의 부식 피로

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 신호순
(0637shin@reseat.re.kr)

1. 머리말

- 피로 균열은 해상 구조물의 생산, 수송 및 설치 도중에 구조물에 미리 존재했던 결함으로부터 확산될 수 있다. 피로 균열은 제어되지 않으면 균열 성장이 불안정한 단계에 도달했을 때 구조물의 실패나 붕괴로 성장할 수 있다. 해상 구조물은 혹독한 해양 환경 때문에 부식 공격에 취약할 수 있고 구조물의 심각한 수준의 손상에 도달하여 서비스 수명을 단축할 수 있다.
- 풍력터빈 구조물 같은 새로운 종류의 구조가 해상에 개발되고 설치되었다. 모노파일 구조물이 가장 일반적으로 사용되는 해상 풍력 지지 구조물이다. 현재, 이들 대형 지름 구조물의 부식 피로 성장 거동에 관한 정보가 부족해서 문제가 제기되고 있고 더 잘 이해될 필요가 있는 연구 분야로 남아 있다. 부식 피로의 이해는 실험에 의하여만 달성될 수 있고 해상 강구조물의 거동에 관하여 확신을 얻을 수 있다.
- 현존 설계 지침은 30여 년 전 오일 및 가스 구조물에 수행된 연구에 근거해서 개발되었다. 그러나 상당수의 첫 모노파일 구조물은 제조의 부피, 지지 구조물에 작용하는 작업 및 환경 하중의 크기와 빈도 때문에 대형 지름 모노 파일의 설계 요구 범위 밖에 있는 표준에 근거해서 작업하고 있다. 그러나 적용된 하중의 크기는 터빈 크기, 수심, 토양 조건 및 지지 구조물의 종류에 의존한다.

2. 다른 종류의 해상 풍력터빈 지지 구조물의 개요

- 2013년 말 영국의 해상풍력 생산 용량은 세계의 나머지 국가들에 비해 50%를 넘었다. 연구 자금, 실험 및 입증 설비가 영국 정부에 의해 충분

히 수행된다면 약 40,000개의 일자리가 2020년까지 해상 풍력 산업에 의하여 제공될 것이다. 영국 해상 풍력 단지의 대부분은 모노파일 구조물에 지지된 풍력 터빈을 갖는 약 30m의 얕은 해수 깊이에 설치되어 있다.

- 모노파일은 전형적인 벽 두께 150mm, 직경 6m 및 650톤까지의 중량을 가지고 있다. 그러나 모노파일 지지물의 주된 한계는 더 깊은 수심에서의 연성이다. 이는 모노파일이 축 하중, 측면 하중 및 굽힘 모멘트에 의하여 어느 수준의 굴곡과 진동을 경험하기 때문이다.
- 재킷 구조물은 50m까지의 수심에서 풍력 터빈 설치를 위하여 적당하고 모노파일 구조와 비교하여 제작에 사용된 강재의 양을 약 50% 감소시킨다. 현재 해상 풍력 구조물의 약 96%가 모노파일 지지 구조물에 지지되고 나머지 4%가 재킷 구조물에 지지된다.

3. 해상 풍력 에너지의 경제성

- 해상풍력 구조물의 프로젝트 비용은 육상 시스템보다 2배 또는 3배 더 높다. 현재 해상풍력 산업의 주요 도전의 하나는 자본 비용(CAPEX)의 약 20%를 커버하는 하부 구조물의 생산과 설치를 위한 해상풍력 구조물의 비용 절감이다. 해상풍력 시스템의 전체 비용은 기초, 설치 및 작업과 보수에 관련이 있다.
- 구조물 기초의 작업과 보수는 총 비용의 30%인 반면 육지의 전력망 연결 비는 풍력 터빈의 약 25%이다. 이는 하부 구조물의 생산과 설치비가 감소되면 풍력 구조물의 전체 비용에서 상당한 감소가 이루어질 것이다. 전력망 연결, 기초, 지지 구조물, 물류와 설치, 작업과 보수의 결합된 비용이 약 57~71%이다.

4. 모노파일 지지 구조물의 설계에서 부식피로 손상에 대한 도전

- 최근 발전된 상당수의 제조 기술, 검사 및 설계 기술 때문에 1세대 모노파일과 강관접합 강구조물에 사용된 현존 설계 표준을 갱신할 필요가 있다.

- S355J2+N강과 같은 새로운 등급의 강이 해상풍력 모노파일 제조를 위해 현재 사용되고 있고, 더 좋은 제조기술 때문에 이들 등급의 강이 인성과 용접성을 향상하기 위해 성질을 개선하였다. 그러므로 구 BS4360 50D강으로부터 실현된 피로 데이터는 재료 변화 때문에 S355J2+N강과 같은 현재 등급의 강에서 얻은 것과 같지 않을 것이다.
- 피로 거동은 온도, PH, 용존 산소 및 염도의 변화에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. PH가 8.5에서 6.5로 감소와 산소 농도가 7에서 1mg/l은 50D강에서 크랙 성장률에 사소한 영향을 미친 반면, 온도를 5℃에서 20℃로 증가했더니 크랙 성장률이 2배나 증가했다.

5. 서비스 하중 조건의 모사

- 대다수의 피로 데이터는 고정 진폭 하중 아래서 얻어진다. 이것은 고정 진폭 하중을 사용하여 얻은 데이터가 구조물의 이해를 위하여 기준선으로 사용되는 것이 분석하기 쉽고 다른 소스로부터 결과와 쉽게 비교되기 때문이다.
- 실험실 모사된 해수 환경 내에서 실현된 피로 환경 데이터가 실제 구조물의 균열 성장 거동을 예측하기 위하여 추론될 수 있다. 일정 진폭 하중 하에서 얻은 재료 데이터는 하중 상호작용 영향이 적절하게 정량화 될 수 있으면 스펙트럼 하중 하의 예측을 구현하는데 사용될 수 있다. 일정 진폭 하중 하에서 실현된 피로 데이터는 하중 상호작용 효과를 무시하고 피로수명 추정을 위해 사용될 수 있다.

6. 해양 환경에서 피로 균열 성장에 영향을 주는 요소들

- 금속의 부식피로 거동에 영향을 주는 중요한 요인들은 기계적, 금속학적 및 환경적 변수로 구분된다. 기계적 변수들은 하중 빈도, 응력 강도 계수, 하중 파형, 하중 상호작용 효과(변동 하중), 잔류/평균 응력, 재료 종류와 기하학적 형상이다. 금속학적 변수는 미세 조직, 재료 성분, 기계적 성질, 열처리 등이다. 환경적 변수는 온도, PH, 음극 방식(CP: Cathodic Protection)의 수준, 코팅 종류 및 산소 농도 등이다.

- 온도가 0.05 Hz의 하중 주파수에서 0℃와 4℃ 사이에 유지되었을 때 균열 성장률에 대한 환경의 뚜렷한 영향이 있었다. 공기 중에서 주파수의 영향은 무시해도 될 정도이고 0.05에서 0.3의 응력률의 증가에 공기 환경에서 큰 영향은 없었다.
- 피로 균열 증가에 대한 주파수의 효과
 - 하중 사이클의 주파수 성분은 부식피로 공정을 제어하는 중요한 파라미터의 하나이다. 저 사이클 주파수가 공기 중 반응에 비교해서 부식 환경에서 더 손상을 주는 것을 보여 주었다. 이는 크랙 팁이 사이클당 전기 화학적 요소에 노출된 더 긴 시간 때문이다. 이는 해수에서 균열 전파에 고주파수를 사용하면 부식 환경의 환경적 영향을 상당히 감소시킬 것이다.
 - 해수의 손상 효과는 저 사이클 하중 주파수에서 더 높다. 공기 중에서는 주파수의 영향은 중요하지 않은 것을 보여 주었다. 용접 영역은 용접의 기하학적 형상과 용접 중 소개된 잔류응력의 크기에 의하여 부여된 응력집중의 수준 때문에 균열 개시의 잠재적 장소이다. 피로 크랙은 용접 열 영향 부위(HAZ)에서 시작해서 영향을 안 받은 모재로 전파한다. 이는 HAZ가 다양한 기계적 성질을 가진 이질적 미세 조직을 포함하고 있기 때문이다.
- 피로 균열 성장에 대한 평균 응력의 효과
 - 평균 응력의 증가는 크랙 성장률의 증가를 야기하지만 이는 균열 성장 부위, 재료 및 환경에 의존한다. 증가된 응력률, 균열 성장률에 대한 해수의 영향은 공기환경보다 상당히 높다. 이는 더 큰 균열 팁 노출 면적이거나 높은 응력률에서 발생하는 균열 개구 변위 때문이다.
 - 실험 온도의 증가가 균열 성장률을 증가시킨다. 압축 잔류응력 하에서 크랙 성장의 지연이 발생하고 이는 피로균열 성장에 이롭다. 피로 균열 성장은 인장 잔류 응력 하에서 강화되는 반면 압축이나 이로운 잔류 응력은 균열 성장에 저항한다. 후 열처리(PWHT)가 잔류 응력

을 제거하기 위해 용접에 적용되지만 잔류응력 효과는 완전히 제거되지 않는다.

○ 음극 방식의 영향

- 부식 환경의 영향이 응력 강도 계수 범위와 CP의 적용 수준에 따라 공기에서 2/4의 계수에 의한 피로 균열 성장률을 높이는 것이 발견되었다. 부식 피로 균열 성장은 일차적으로 균열 팁에서 금속의 용해와 수소 취성에 의하여 제어된다. 고 용해율에서 균열 둔화의 메커니즘이 고 소성 영역 크기에 의하여 수반된 고 응력 강도 계수 범위에서 발생한다.
- CP 하에 발생하는 두 가지 주요 반응은 산소 환원과 수소 생산에 이르는 물의 환원이다. 산소의 환원은 음극 반응이며, 감압된 전류나 희생 양극 CP 시스템에 의한 저 수준의 용존 산소와 음극 보호로 인해 수소 환원이 발생한다.

7. 용접부의 피로 균열 성장

- 대부분의 해상 구조물은 피로 균열 개시를 위한 잠재적 장소인 용접 접합으로 제조된다. 용접 열영향 부위(HAZ: Heat Affected Zone)는 사용된 용접 공정의 종류에 따라 다양한 미세조직과 기계적 성질과 관련되어 있다. HAZ 재료의 균열 성장 거동은 용접 부위나 모재에 가까운 균열 개시 장소에 의존한다. HAZ는 항복 응력의 크기까지 될 수 있는 인장 잔류응력을 가진 것으로 알려져 있다.
- 좀 더 최근에 S355J2+N강으로 제작된 모재와 HAZ의 균열 성장률에 대한 결과가 제시되었는데 균열 성장률은 공기 중에서 HAZ보다 모재에서 더 높았으나 해수에서는 균열 성장률이 양쪽 재료에서 유사한 것을 발견하였다. 결과는 재료의 잔류 응력의 효과로 설명되었다.
- 시편의 노치 팁이 잔류응력 분포의 압축 부분 근처에 위치해 있을 때는 지연된 균열 성장이 균열 폐쇄 현상 때문에 발생한 것 같다. 그러나

인장 잔류 응력 종류에서는 가속된 균열 성장이 발생할 것이다.

8. 맺음말

- 해상풍력 모노파일 구조물 거동의 이해를 위한 필요가 해상 풍력 부문의 첨단 기술과 도전에 관하여 강조되었다. 다양한 강의 균열 성장 거동이 검토되었고 특별한 주의가 해상 풍력 설치를 위해 사용된 강종에 주어졌다. 본문으로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.
- 현재 이용 가능한 피로 설계 지침은 해상 풍력 구조물의 설계 요구에 맞게 갱신될 필요가 있다. 구조물이 서비스에서 가능한 한 가깝게 경험하는 것을 모사하는 환경에서 모노파일 제조를 위하여 사용되는 것과 유사한 모재, 열영향 부위(HAZ: Heat Affect Zone) 및 용접재료의 거동을 이해할 필요가 있다.
- 문헌 검토는 해양환경에서 강의 부식피로 균열 성장 거동이 많은 변수에 의해 영향을 받을 수 있다는 것을 보여 주었다. 환경시험 조건에서 상당한 차이가 시험에 사용된 지배적 파라미터를 받는 재료의 균열 성장 거동에도 주목할 변화를 초래할 수 있다.
- 피로 균열 성장에 대한 평균 응력의 영향은 재료와 시험 환경에 의존한다. 그 영향은 공기 환경에서 중요하지 않을 수 있으나 해수에서는 응력비 증가가 환경과 하중 빈도의 상호 작용으로 균열 성장률에 영향을 줄 수 있다. 용접물의 피로 균열 성장 거동은 재료에만 의존하지 않고 환경, 하중 조건, 미세 조직, 용접 절차 및 잔류 응력에 의하여도 상당한 영향을 받을 수 있다.

출처 : Oyewole Adedipe, Feargal Brennan, Athanasios Kolios, “Review of corrosion fatigue in offshore structures: Present status and challenges in the offshore wind sector,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 2016, pp.141 - 154

◁ 전문가 제언 ▷

- 해상풍력은 영국에서 신형 지속 가능한 에너지원이다. 해상풍력 터빈 지지 구조물은 오일과 가스 응용을 위해 사용되는 구조물과 유사하게 주로 용접된 튜브 부재로 제조되고 고도로 역동적이고 혹독한 해양환경에 노출된다. 그러나 이들의 구조적 상세와 설계 요구는 지지 구조물에 작용하는 작업과 환경 하중의 크기와 빈도 때문에 상당히 다르다.
- 이들 조건은 적용된 하중의 크기 때문에 구조적 동적 반응 특성에 크게 영향을 미친다. 그러므로 이것은 부식이 지지 구조물에 손상과 관련될 수 있는 균열 성장 거동과 정도에 중대한 영향을 줄 수 있다. 그러나 적용된 하중의 크기는 터빈의 크기, 수심, 토양 조건 및 지지 구조물에 의존할 수 있다. 그러므로 경제적 및 안전작업을 보증하기 위하여 규정된 한계 상태에 맞서 풍력터빈 지지 구조물을 설계하는 것이 필수적이다.
- 본문은 해수, 환경 및 기계적 하중의 영향에 관한 해상 구조물의 부식 저항의 검토를 제시하였다. 해상 풍력 구조물의 요구에 적합한 현존 부식 저항을 갱신하기 위한 설명이 제시되었다.
- 자유 부식 해수 조건에서 균열 성장률을 계산하기 위한 실험 절차가 설명되었고 실험실에 모사된 해수환경에서 균열 길이를 예측하기 위한 방법이 개발되었다. 부식 실험의 균열 성장률은 공기에서 관측된 율 보다 빨랐으나 공기에서보다 2배 이상 빠르지는 않았다. 배면 변형률 측정이 광학적 측정이 적용되지 않는 부식 환경에서 균열 성장 측정을 위한 신뢰성 있고 비용 효율적인 방법이다.
- S355J2+N강의 공기와 해수에서 피로 균열 성장 거동은 해상 풍력 설치를 위한 다른 종류의 고장력강보다 더 좋았다. 현재 유럽에서 해상 풍력 모노파일의 용접에 사용되는 새로운 강종인 S355J2+N강의 용접 절차는 소형 지름의 파이프에서 수집된 오일과 가스 산업에서 사용하던 피로 데이터와 용접 절차서를 사용하고 있어서 실험실 연구를 통한 새로운 용접 절차서와 피로 데이터가 개발되어야 한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.