

특집

풍력터빈의 소음진동

육상 및 해상 풍력발전기 지지 구조물의 설계평가(구조, 진동) 시스템

이 강 수*

(한국선급 녹색산업기술원)

1. 머리말

풍력발전기의 지지구조물은 바람, 파도, 해류 등의 환경하중, 상부구조물 등의 각종 기계설비로부터의 하중을 받는다. 풍력발전기의 파괴는 환경오염 및 환경자원개발의 손실뿐만 아니라 인명재산피해까지 이어 질 수 있으므로, 지지구조물의 구조적 안정성은 설계와 관리에 있어서 아주 중요한 부분이다. 풍력발전기 지지구조물은 설계, 제조 및 설치가 완료되어 전력을 생산하기 까지 여러 단계를 거치게 되고 제조자는 단계별로 국제규격에 따라 인증기관(certification body)으로부터 인증서(certificate)를 획득하게 된다. 지지구조물의 인증은 공인된 시험기관에서 시험되고 평가되며 하중, 성능, 전력품질, 구조적 안전성 및 기타 특성을 국제적으로 공인된 기준과 부합됨을 풍력발전기의 구매자에게 확인시키는 것을 의미한다. 즉 인증은 풍력발전에 관심이 있는 전력회사, 정부, 개인 및 기관 투자자들에게 있어 투자를 결정하는 주요 지표 중의 하나이다. 인증시스템을 도입하는 이유는 제 3자가 제품, 공정 또는 서비스가 지정된 요구사항(설계기준)에 적합하다고 서면으로 보증하는 절차(적합성 평가)와 풍력발전기의 성능평가를 수행하는 절차로 대별될 수 있으며 풍력발전기의 안정성 확보와 국제규격에 부합하는 풍력발전 시스

템을 제작하여 국제무역을 촉진하고자 함에 있다. 국내에서도 정부 지원으로 중대형 풍력발전기의 국내 보급을 목적으로 국산화 개발이 진행되어 현재 750 kW급과 1.5 MW급은 양산단계에 있으며 2 MW급과 3 MW급이 평가 및 개발 중에 있다. 또한, 인증은 특성상 풍력발전기의 설계과정부터 제조 후 전력을 생산하기까지 인증기관이 참여해야 하므로 풍력발전기 제조회사의 육성과 더불어 정부의 지원 아래 풍력발전기의 인증과 관련하여 성능 평가 시험 시스템 및 설계적 합성 평가 시스템이 구축 중에 있다.

이 글에서는 풍력발전기의 인증에 대하여 소개하고 풍력발전기의 지지구조물의 설계평가(구조, 진동) 시스템을 기술하고 풍력발전기 국제표준화 동향에 대하여 소개하였다.

2. 풍력발전기의 인증

인증은 풍력발전기가 설계평가에서 시운전 및 운전의 모니터링까지 풍력발전기의 형식, 주요 구성부품 형식 또는 지정된 위치에서의 1기 이상의 풍력발전기에 대해 제 3자(인증기관)에 의한 적합성 평가로 구성되며, 평가의 결과로는 다음 4가지의 인증서가 발행된다.

- 형식인증서(type certificate)
- 사업인증서(project certificate)

특집 : 풍력터빈의 소음진동

- 부품인증서(component certificate)
 - 프로토타입인증서(prototype certificate)

형식인증은 한 가지 형식의 풍력발전기에 적용되는 것으로서 타워 및 타워와 기초 사이의 연결 형식을 포함하며 풍력발전기 형식이 설계가정, 지정된 규격의 요구사항에 적합하게 설계되고 문서화되며 제작 확인하는 것으로써 설계문서 대로 설치되고 운전되며 관리된다는 검증이 필요하다. 사업인증은 형식인증된 풍력발전기 및 특별한 기초설계가 해당사이트의 외부조건을 충족시키는지의 여부와 해당지역의 법규 및 사이트의 기타 요구사항과 일치하는지를 확인하는 것이다. 부품인증은 블레이드와 기어와 같이 풍력발전기의 주요 부품들이 설계가정, 지정된 규격 및 기타 기술 요구사항에 적합하게 설계되고 문서화되며 제조되는지를 확인하는 것이다. 프로토타입인증은 양산되지 않은 새로운 형식의 풍력발전기의 시험을 위한 인증절차로서 최대 3년의 유효기간을 갖는 인증서가 발행되며 안전에 영향을 줄만한 수정이 가해지면 새로운 인증서를 발급 받아야 한다.

3. 설계평가 및 프로젝트 이증

3.1 설계평가

설계평가(design evaluation)는 형식인증 절차에서 의무사항(mandatory module)으로서 형식인증을 받고자하는 신청자가 인증기관에 제출한 설계문서를 바탕으로 풍력발전기 형식이 설계가 정, 지정된 규격 및 기타 기술적 요구사항에 맞게 설계되고 문서화되었는지를 평가하는 것이다. 따라서 신청자가 제출하는 설계문서는 설계규격, 설계인자, 설계가정 및 제조, 이송, 설치 및 시운전과 관련된 요구사항 등을 포함해야 한다. 형식인증의 절차는 그림 1과 같다.

인증기관은 설계평가보고서를 평가한 후 적합 확인서를 발행한다. 설계평가를 포함하여 형식 인증서의 각 항목들에 대한 평가가 끝난 후 각각 적합 확인서가 발행되며 모든 평가결과를 종합

하여 최종 평가가 수행되며 최종 평가 보고서가 신청자에게 제출 된다. 또한 보고서가 완전하고 정확하다고 판단되면 최종적으로 그림 2와 같이 형식인증서가 발행된다.

3.2 프로젝트 인증

프로젝트 인증(project certification, 단지인증)은 풍력발전단지에 대하여 단지의 적합성, 설계평

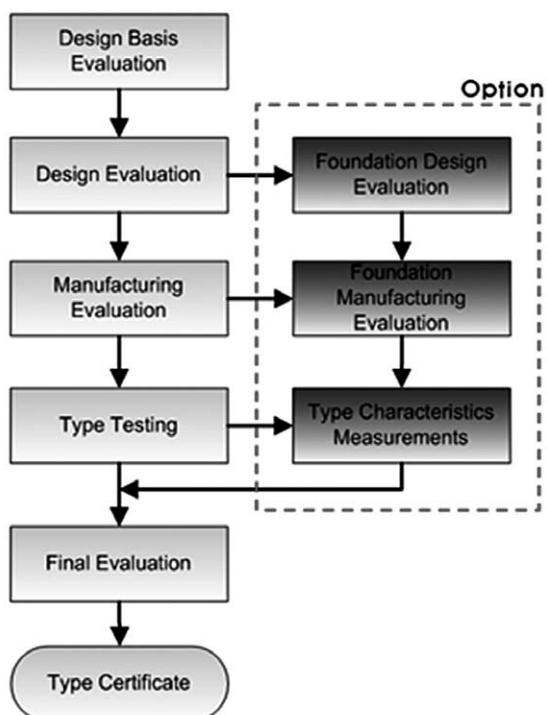


그림 1 형식인증 과정

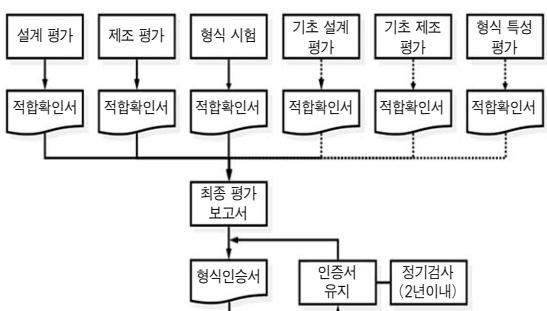


그림 2 최종 형식인증서 발급 과정

가, 운송 및 설치를 포함한 프로젝트 전반에 대한 인증이다. 프로젝트 인증은 형식인증 된 풍력발



전기 및 특정 기초 설계가 해당 사이트의 외부조건을 충족시키는지 여부와 적용 가능한 지역 법규 및 해당 사이트에 관련되는 기타 요구사항과 일치하는지를 확인하는 것이다. 이 인증은 그 사이트에서의 바람 조건, 기타 환경조건 및 전력계통 조건 및 토양특성이 그 풍력발전기 형식 및 기초에 대해 설계문서에 정의된 내용을 충족시키는지를 확인하는 것이다. 또한, 설치 및 시운전이 지정된 규격 및 기타 기술 요구사항에 따르는지를 확인하며, 풍력발전기가 관련 매뉴얼에 따라 운전 및 정비되고 있는지를 확인하여야 한다. 프로젝트 인증의 절차는 사이트의 바람조건, 전력

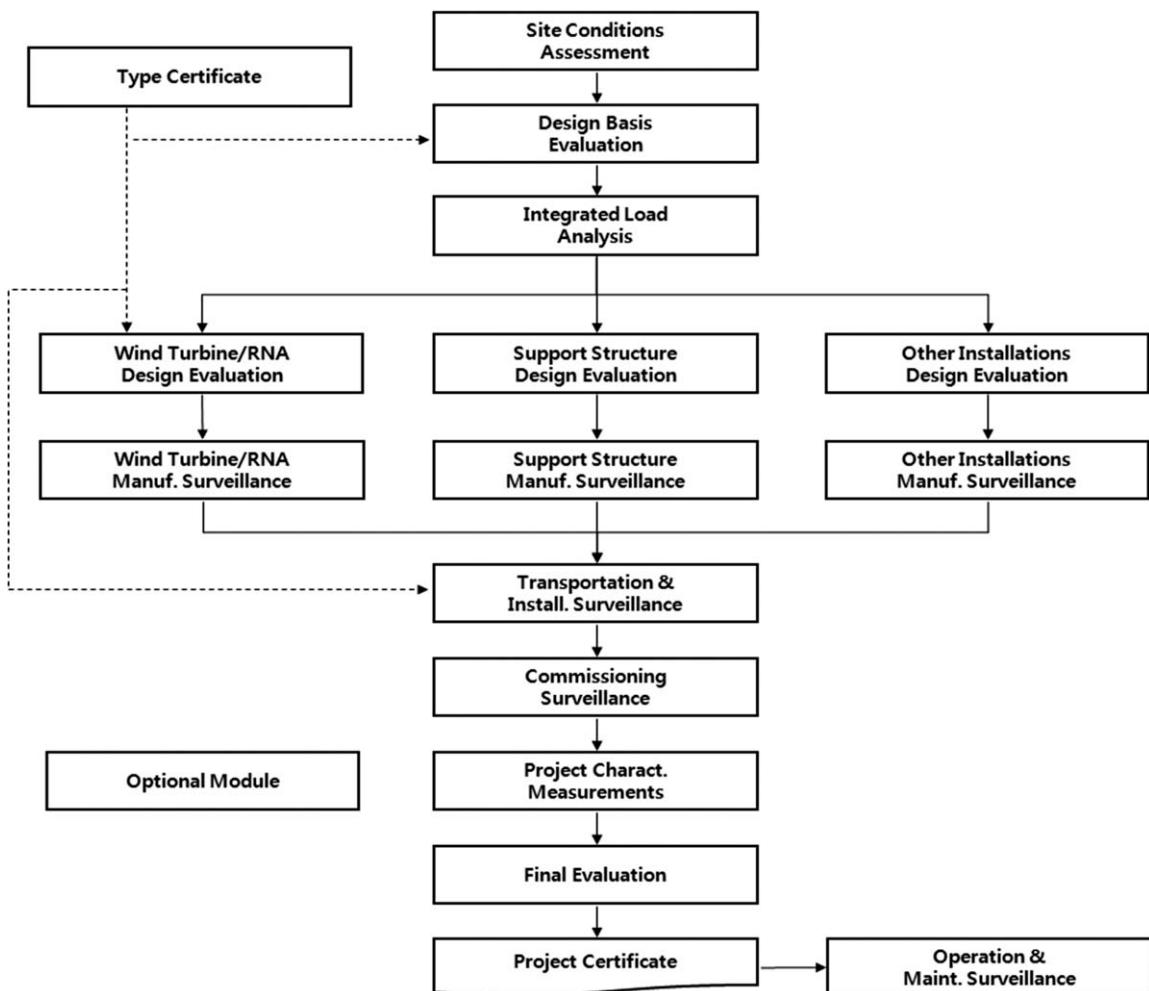


그림 4 프로젝트 인증 절차

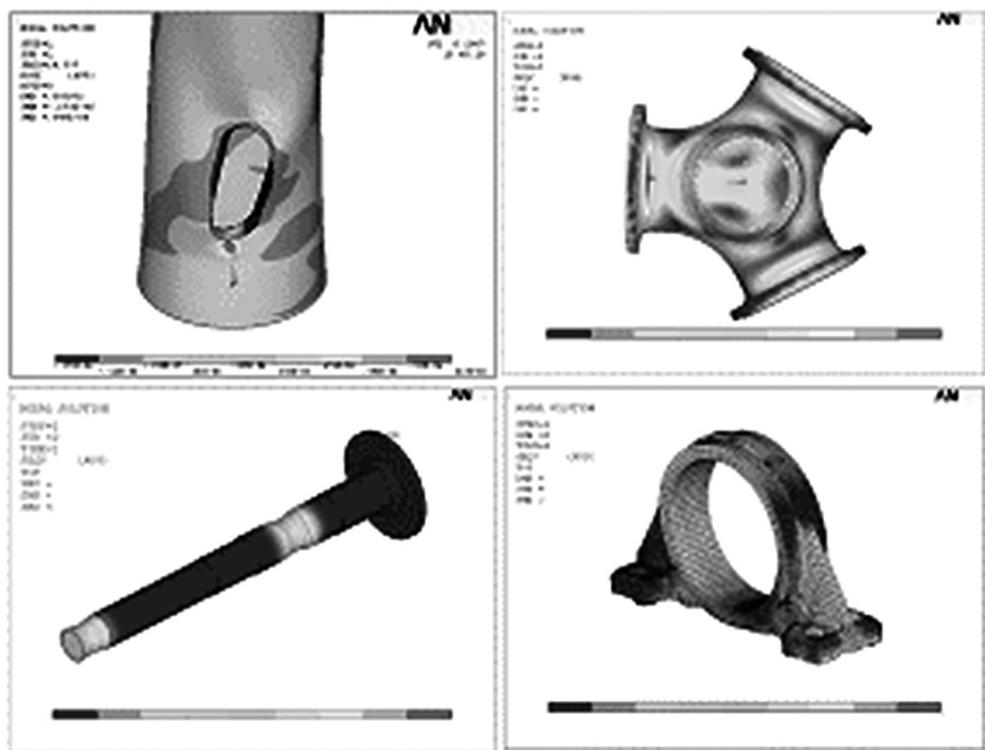


그림 5 구성품의 건전성 평가

계통조건, 지반특성이 풍력발전기에 적합한지 평가, 설치 및 시운전 등이 특정규격 및 기타 기술요구사항과 일치하는지 평가, 운전 및 유지관리가 관련 절차서와 일치하게 관리되는지 평가 하며 인증유지를 위해서는 인증기관 또는 제 3의 기관이 정기적인 O&M 검사를 하게 된다. 프로젝트 인증에 관한 절차와 사이트평가에 관한 내용은 그림 3과 같다.

풍력시장은 소규모에서 대규모로 넘어가는 추세로 점차 100 MW 단위로 대형화되고 있다. 이에 따라 유럽에서는 이미 대단위의 해상풍력단지가 몇 년 전부터 운용되고 있다. 국내에는 전라남도 및 전라북도 해상지역에 2.5GW급의 해상 풍력발전단지 조성계획이 지식경제부 '해상풍력발전단지 조성 추진 로드맵'에 따라 국내에도 해상풍력 발전단지가 건설될 전망이고 대규모 해상풍력 발전단지가 건설될 경우 프로젝트 인증은 필수적이다.

4. 지지구조물 설계평가-구조

하중계산 결과를 이용하여 하중이 가해지는 기계와 구성품의 설계를 평가해야 한다. 대상에는 주조, 단조 혹은 용접구조, 나셀 프레임, 타워, 피치(pitch) 및 요(yaw) 시스템, 베어링과 엘라스토머 부싱, 기어박스, 브레이크, 커플링 및 잠금장치, 연결 볼트, 냉각 및 가열 시스템, 유압시스템 등이 포함된다. 그림 5는 타워의 출입문, 허브, 축 및 베어링 하우징에 대한 유한요소 해석결과를 나타낸다.

설계문서에 기술된 기초(foundation) 설계 요구 사항이 기초설계에 적합한지를 평가하는 것으로써 타워와 기초의 경계면에서의 수직, 수평력 및 모멘트와 같은 설계하중과 특성하중이 설계 평가에 이용된다. 또한 조합 가능한 모든 하중 케이스를 이용하여 극치 동적 하중과 피로 하중이 고려된다. 한편, 풍력발전기의 고유진동수 및 진

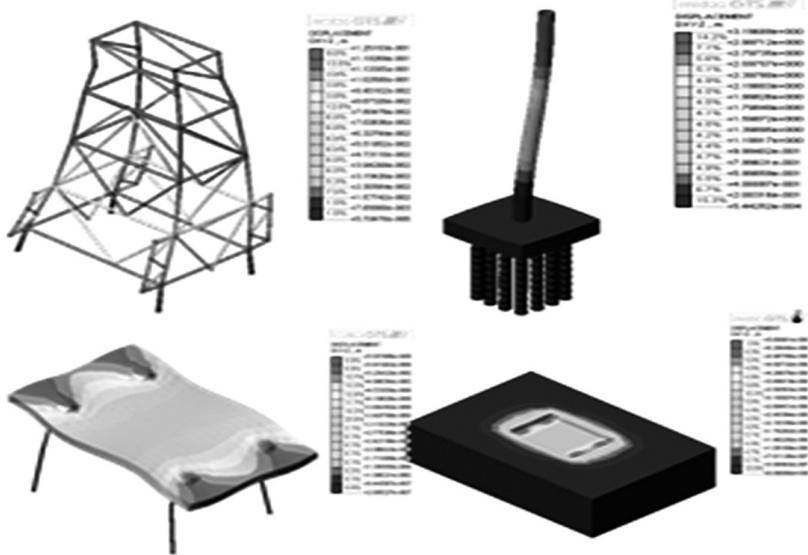


그림 6 기초부의 건전성 평가

동모드에 영향을 줄 수 있는 기초의 내구성(resistance)과 유연성(flexibility)이 풍력발전기가 설치될 사이트의 토양조건을 고려하여 평가되어야 한다. 그림 6은 유한요소 해석을 이용하여 기초부의 응력분포를 나타낸다.

제작절차 평가에서는 설계문서에 명시된 품질 요구조건에 따라 풍력발전기가 제작될 수 있는지를 검증과정이며 기술규격, 제한조건, 필요도구, 하중조건이 포함된다.

5. 지지구조물 설계평가-진동

5.1 진동관련 인증검토 항목

한국선급 기술기준 내의 인증검토 항목은 다음과 같다.

- 동적 풍하중에 의해 발생하는 진동으로 인하여 구조적 안정성에 영향을 주어서는 안 된다.
 - 회전 장치 및 기타 요소에 의해 발생하는 진동에 의해 공진이 발생하지 않도록 설계하여야 한다.
 - 동적 응답 및 공진
- (1) 타워의 1차 고유진동수는 로터의 주파수 및 블레이드의 통과 주파수와 일치 하여서는 안

된다.

(2) 타워의 고유진동수는 로터의 주파수의 범위 영역 외에 존재하여야 하며 또한 블레이드 통과 주파수에 대하여 주파수 범위 영역 외에 존재하여야 한다.

$$\frac{f_R}{f_1} \leq 0.95 \quad \text{또는} \quad \frac{f_R}{f_1} \geq 1.05 \quad (1)$$

$$\frac{f_{R,m}}{f_n} \leq 0.95 \quad \text{또는} \quad \frac{f_{R,m}}{f_n} \geq 1.05 \quad (2)$$

여기서

f_R = 운전 중의 로터의 최대 주파수

f_1 = 타워의 1차 고유진동수

$f_{R,m}$ = m로터 블레이드의 통과 주파수

f_n = 타워의 n차 고유진동수

(3) 풍력발전기에 두 개 이상의 발전기가 설치된 경우나 발전기의 회전속도가 두 가지 이상인 경우 풍력발전기는 타워 고유진동수의 $\pm 5\%$ 이내의 영역에서 운전되어서는 안 된다.

(4) 타워의 고유진동수는 측정 장비를 이용한 직접 측정 및 동적해석을 통한 고유진동수 계산을 통하여 확인하여야 한다.

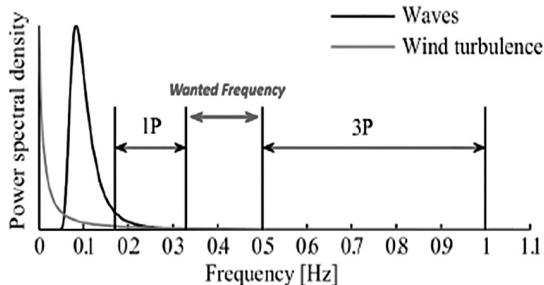


그림 7 현대적인 해상풍력터빈에서 외부 가진력의 주파수 범위(LeBlanc, 2009)

또한 해상용 풍력발전기의 지지구조물 설계 시 우선적으로 고려해야 할 사항은 공진(resonance)을 회피하는 것이다. 해상용 풍력발전기의 주요 외력(exciting force)은 바람에 의한 로터의 회전(rotating frequency)과 각 날개가 회전할 때마다 발생하는 통과주파수(passing frequency) 및 육상용 풍력발전기에서는 경험할 수 없는 파랑에 의한 주기적인 하중이다. 일반적으로 MW급의 해상용 풍력발전기의 회전주파수 범위와 파랑의 피크 스펙트럼 주파수(peak spectral frequency) 범위는 그림 7에서와 같이 동일한 영역대를 형성한다. 지지구조물이 공진을 회피하도록 설계하기 위해서는 그림 7에서 나타난 바와 같이 파랑의 스펙트럼 분포와 풍력발전기의 회전주파수와 블레이드의 통과주파수의 범위를 고려하여 설계를 해야 한다.

6. 풍력발전기 국제 표준화 동향

풍력발전기에 대한 국제표준을 제정하는 국제 전기기술위원회(IEC)의 풍력발전기 기술위원회(TC88)가 있으며 풍력발전기의 설계요건, 공학적 안정성, 측정기술 및 시험절차를 다루게 되며 설계, 품질보증 및 인증을 위한 절차 등을 개발하고 있다. IEC TC88은 1988년 설립돼 33개 회원국으로 구성돼 있으며, 의장은 미국이, 간사는 네덜란드가 수임하고 있으며, 독일과 덴마크 등 유럽 국가들이 중심이 되어 활동하고 있다. 우리나라

는 2002년 정식 회원으로 가입한 이후 꾸준히 활동을 하고 있으며 2009년에 부유식 풍력발전기의 설계기준을 제안하였고 TC88 승인을 받았으며 국내 전문가들이 참여하여 국제표준안 작업을 하고 있다.

한국에서는 한국의 해상풍력로드맵과 주요 연구주제 및 최초 제안한 부유식 해상풍력발전기 관련 새로운 제안에 대한 각국의 국가적인 견해를 반영하여 개정본을 발표하였다. 우리나라가 제안한 부유식 풍력발전기의 기술기준 제정에 대부분 국가들이 적극적 참여를 하고 있으며 향후 이 분야를 리드하기 위한 국내 전문가들의 적극적 참여가 필요하다. 새로이 제안된 내용은 IEC 61400-3(고정식 해상풍력발전)과는 별도로 이루어지며 새로운 부유식에 대한 작업반(working group)이 만들어져 표준안 작성이 진행되고 있다.

7. 맷음말

지금까지 해상풍력발전기의 인증체계, 설계평가와 프로젝트 인증, 지지구조물의 설계평가(구조, 진동) 시스템, 풍력발전기 표준화 국제표준화동향에 대해 간략히 소개하였다. 해상 풍력에너지의 발전량은 육상보다 높고 대규모 단지개발을 통해 발전비용이 육상보다 줄어들기 때문에 초대형 풍력발전 시스템 개발 및 설치가 증가하고 있다. 또한 해상풍력발전은 해안에서 멀어 질수록 비용이 증가하고 유지보수가 쉽지 않아 제품의 신뢰성이 상대적으로 높아져야 한다. 해양풍력발전의 지지구조물은 외부수압, 바람, 파도, 해류, 조수, 빙하, 지진 및 각종 기계설비로 부터의 하중을 받는다. 해양풍력발전의 지지구조물의 파괴는 해양오염 및 해양자원개발의 손실뿐 만아니라 인명재산피해까지 이어 질 수 있으므로, 풍력발전기 지지구조물의 설계평가(구조, 진동) 등을 통한 구조적 안정성은 구조물의 설계와 관리에 있어서 아주 중요하게 다루어져야 할 것이다. **KSNVE**