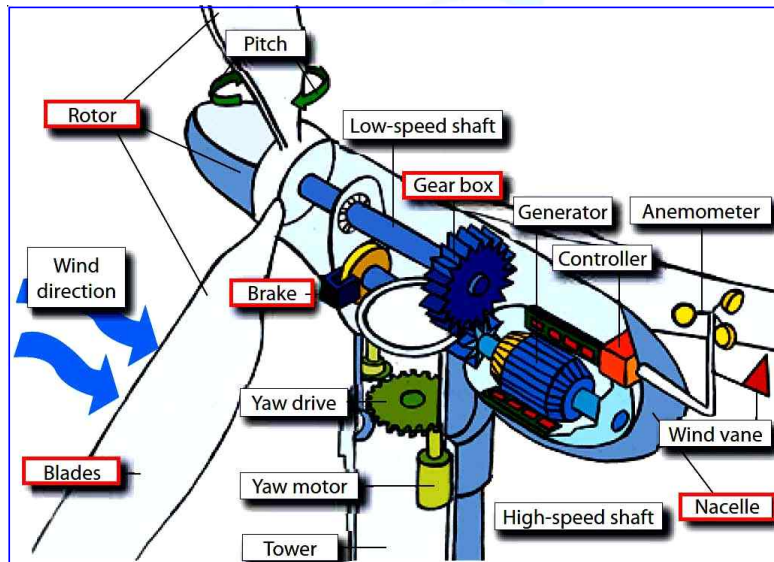


# 해외 풍력발전기 사고 예방, 안전 점검 기술

한국과학기술정보연구원  
 전문연구위원 백태현  
 (thbaek@reseat.re.kr)

## 1. 서론

풍력터빈 발전기는 바람의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 장치이다. 풍력터빈 발전장치는 수직축 또는 수평축 형태 등 다양한 구조로 제조될 수 있다. 대형터빈을 이용한 풍력발전 장치는 무공해 에너지 발전 산업으로 각종 신재생에너지 중에서 경제성이 높은 에너지원으로 주목받고 있으며, 화석연료에 대한 의존도를 줄이기 위한 전략의 일환으로 많은 국가에서 사용량이 증가되고 있는 추세이다.<sup>(1)</sup> 수평축 구조의 풍력발전기에는 <그림 1-1>과 같이 여러 기능을 갖는 기계 및 전기부품이 사용된다.<sup>(2)</sup>



<그림 1-1> 수평축 풍력발전기 주요 구성 부품<sup>(2)</sup>

풍력터빈은 여러 부품이 조립된 부결합체(sub-assembly)로 구성되어 있다. 풍력발전기의 부품들도 다른 설비들과 마찬가지로 마모되고 손상될 수 있다. 그에 따라 가동이 중단되어 운전비용이 증가하고 나아가 위험한 사고가 발생할 위험도 있다. 수직축 형태의 풍력발전기는 기둥 구조물인 타워와 이를 지지하기 위한 구조물 이외에도, <그림 1-1>에 보인 바와 같이 나셀에는 여러 가지 기계 장치 구성 부품으로 된 시스템이 있으며, 블레이드, 로터 허브, 기어박스 및 브레이크<그림 1-1>의 적색 사각형으로 표시된 부품

참조)등은 풍력터빈의 기계적 작동기능을 유지하고 안전한 운전상태가 되도록 운전매개 변수 사이에 시스템의 회전속도를 제어하는 기계장치 결합체이다. 브레이크 장치와 변속기 등은 사고의 주요 원인이 되고 있다.<sup>(3)</sup>

풍력발전기의 변속기와 브레이크는 날개가 과속으로 회전하는 것을 방지한다. 이들 부품 중 어느 하나라도 고장이 발생하면 날개가 정상 속도보다 몇 배 더 빠르게 회전하여 날개에 설계치를 초과하는 응력이 작용하게 된다. 이렇게 되면 로터 날개 끝부분의 선속도는 시간 당 수백 km에 달하며, 날개의 일부분이 로터에서 탈락되면 큰 운동에너지를 가지고 비산하게 된다. 만일, 사람이 이런 날개 파편에 맞으면 생명을 잃을 수도 있다. 부러진 날개의 큰 파편이 수 km 이상 먼 거리에서 발견된 사례도 많이 보고된 바 있다.<sup>(4)</sup>

이 분석물은 영국 스코틀랜드의 케이스네스(Caithness) 지역에서 개최되는 케이스네스 풍력단지 정보포럼(CWIF: Caithness Windfarms Information Forum)에서 발표된 세계의 풍력발전단지에서 발생한 비교적 큰 규모의 사고에 대하여 1996년부터 2017년(2017. 5)까지 발생한 풍력발전기 사고 유형을 종류별, 연대별로 분류하고 분석한 것이다.<sup>(5)</sup> 또한 미국 풍력협회(AWEA)에서 발표한 풍력발전기의 수리·고장 비율에 관한 자료도 제시하였으며, 마지막으로 국내의 풍력발전 사고에 관한 자료와 대책도 소개하였다.

## 2. 세계 풍력발전기 사고 종류와 발생 비율

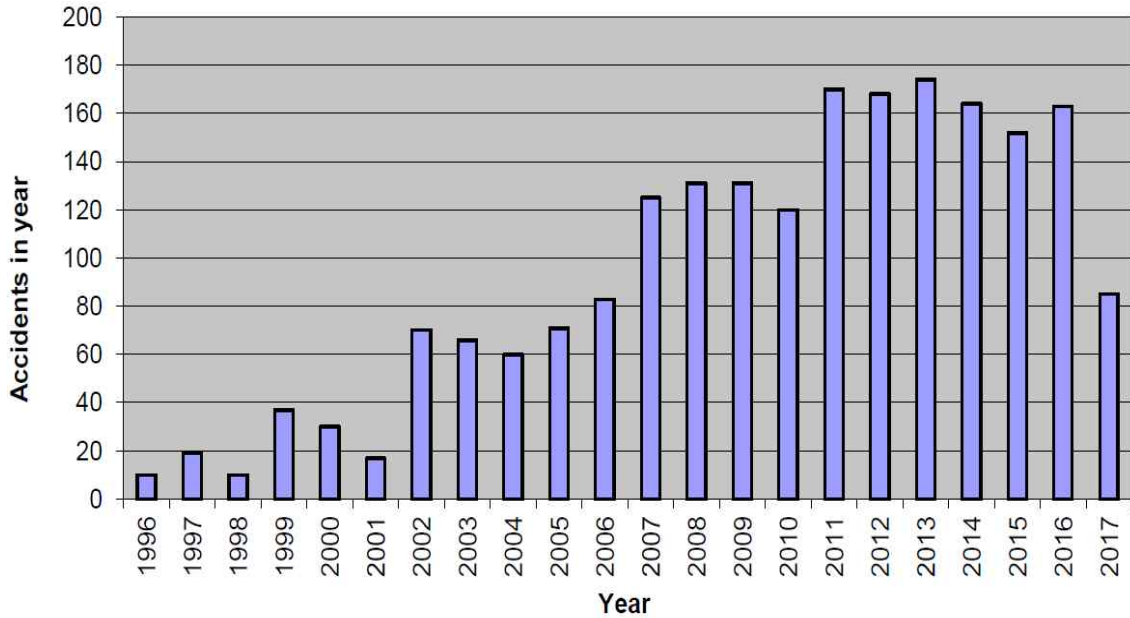
### 2-1. 세계 풍력발전기 사고 현황

세계 풍력발전단지에서 발생한 비교적 큰 규모의 사고에 대하여 CWIF에서 1996년부터 2017년 5월까지 수집한 풍력발전기 사고유형을 종류별, 연대별로 분류한 자료를 발표하였다. 풍력발전기 사고에 관한 연도별 사고 횟수는 <그림 2-1>의 그래프에 표시되어 있다.

이 자료는 전 세계에서 발생한 풍력발전기 주요 사고현황이며 자세한 사고 경위 및 내용은 참고문헌<sup>(4)</sup>에 수록되어 있다. 이 자료에는 1996년부터 2017년 5월 31일까지 공식적으로 언론 또는 다른 방법을 통한 정보공개로 통해 발표되고 확인될 수 있는 풍력터빈 관련 사고에 대한 대부분의 자료가 포함되어 있다. CWIF는 풍력발전기 사고에 관한 이 보고서<sup>(5)</sup>가 필요한 용도에 참고할 수 있는 공식 기록에 의거한 유용한 자료라는 견해를 밝혔다. 그러나 여기서 제시한 데이터는 더 세부적이고 구체적인 상세 사항은 포함되지 않았다.

CWIF는 사고 종류와 빈도 측면에서 이 자료가 단지 극히 일부분인 자료, 즉 “빙산의 일각”인 자료라고 밝히고 있다. 예로서 2011년 12월 11일자 데일리 텔레그래프(Daily Telegraph)<sup>(6)</sup>는 Renewable UK가 지난 5년간 영국에서만 1,500건의 풍력 터빈사고와 고장이 있었음을 확인 보도하였다. 그러나 CWIF의 데이터<sup>(5)</sup>는 영국에서 2006년부터 2010년 사이에 발생한 142건의 사고만 보고되었으므로 실제사고의 9%만 차지하고 있다. 또한 이 자료는 발생할 수 있는 사고유형과 그 결과에 대한 자료만 제공하였다. 1997년

이전에는 단지 치명적인 사고만 보고되었다.



<그림 2-1> 연도별 풍력발전기 사고 횟수(2017년도는 2017.5.31까지 발생한 사고 횟수임)<sup>(5)</sup>

사고발생 추세를 살펴보면 더 많은 터빈이 건설됨에 따라 예상대로 더 많은 사고가 발생되었다. <그림 2-1>에 나타난 자료를 참고로 하면 1997년에서 2001년까지 확인될 수 있는 사고 횟수는 단지 매년 평균 23건의 사고가 발생하였다. 2002-2006년까지 매년 70건의 사고가 발생, 2007-11년에는 매년 135건의 사고가 발생, 그리고 2012-16년까지는 매년 164건의 사고가 발생하여 사고횟수는 지속적으로 증가하는 추세이다.

사고 발생건수의 상승추세는 영국의 보건 및 안전담당 기관(Health and Safety Executives)인 HSE가 몇 가지 중요한 정책적인 변화(예를 들면, 풍력터빈에 의한 인명 위험 및 피해 등)<sup>(7)</sup>를 가져오지 않는 한 지속적으로 증가될 것으로 예상된다. 인명 사고를 예방하기 위해서는 새로운 풍력터빈 설치 시 주택 및 건물 사이의 최소 안전거리를 유지해야 한다. 그러나 현재 영국의 HSE는 현재 풍력터빈의 신뢰성 및 위험평가에 대한 판단자료가 될 수 있는 풍력터빈 고장 데이터베이스를 보유하고 있지는 않다고 밝혔다.

## 2-2. 세계 풍력발전기 사고 분류

CWIF 자료<sup>(5)</sup>에서는 1996년부터 2017년 5월 31일 현재까지 21년 5개월 동안 전 세계에서 보고되고 확인된 연도별 주요 사고종류와 횟수에 관해 <표 2-1>에 나타난 통계 숫자를 발표하였다. 단, 이 표에서 2000년 이전의 사고 횟수는 1996년부터 2000년까지의 사고 횟수를 합한 숫자로 나타냈다. 이 자료는 CWIF에서 발표한 개별적인 데이터를 종합하여 표로 나타낸 것이다. 이 표에서 첫 행의 전체사고 숫자는 ①항에서 ⑩항까지 연도별로 각 행의 숫자를 합하여 나타낸 것이다. <그림 2-1>은 <표 2-1>의 첫째 행에 표시한

숫자를 그래프로 나타낸 것이다. CWIF 자료에서 설명한 각각의 사고 종류에 관한 부가적인 사고 내용은 다음과 같다.

- ① 치명적 인명사고(Fatal accidents): 조사기간 동안 인명사고는 총 132회 발생하였다. 풍력산업에 직접 관련된 인원이나 또는 지원 근로자(다이버, 건설, 유지·보수, 엔지니어 등)가 포함된 경우도 있다. 예를 들면, 풍력산업에 직접 업무에 종사하지 않는 71명의 근로자(운송근로자 등)가 큰 규모의 인명사고를 당하여 2012년 3월 브라질에서 한 건의 사건으로 버스승객 17명이 이 사망했다. 2014년 5월 항공기 추락사고로 4명이 사망했고 2014년 9월에 교통사고로 3명이 사망했다.

<표 2-1> 연도별 세계 풍력발전기 사고 종류 및 횟수 (2017.5.31. 현재)<sup>(5)</sup>

Failure Type	*00	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	**17	Total
Total number	109	30	17	70	66	60	71	83	125	131	131	120	170	168	174	164	152	163	85	2,089
① Fatal accidents	24	3	0	1	4	4	4	5	5	11	8	8	15	16	4	2	7	5	6	132
② Human injury	5	4	1	2	2	2	6	10	16	16	9	14	12	15	9	8	8	9	4	152
③ Human health														6	27	19	13	17	20	102
④ Balde failure	35	4	6	15	13	15	12	17	23	20	26	20	20	28	35	31	19	21	10	370
⑤ Fire	7	3	2	24	17	16	14	12	21	17	17	13	20	19	24	19	18	28	7	298
⑥ Structural failure	15	9	3	9	7	4	7	9	13	9	16	9	13	10	14	13	12	11	6	189
⑦ Ice thow	9	0	0	2	2	4	4	3	0	3	4	1	1	1	0	1	1	3	0	39
⑧ Transport				4		3	6	6	19	10	11	11	24	17	12	17	14	15	8	177
⑨ Environmental damage	1	0	1	1	8	1	6	5	10	21	13	19	20	20	16	21	18	22	9	212
⑩ Other	13	7	4	12	13	11	12	16	18	24	27	25	43	36	33	33	42	32	15	417

\*00: 1996년부터 2000년도 이전까지 발생한 전체 사고 횟수

\*\*17: 2017년 1월 1일부터 5월 31까지 발생한 횟수

- ② 상해 부상(Human injury): 한 사고로 인해 여러 명이 부상당하고 상해를 입어 사고 발생 횟수보다 더 많은 부상자가 발생한 경우도 있다. 152건의 사고 중 168명의 풍력산업 또는 건설/유지보수 근로자가 부상을 입었고, 74명의 공공 근로자 또는 풍력산업에 직접 종사하지 않은 근로자(소방관, 운송 근로자 등)가 풍력산업 관련으로 부상당했다. 이 부상자 중 8명은 영국에서 발생하였다.
- ③ 건강재해(Human health): 2012년 이후, 인체의 건강 재해 및 건강 악화에 관련된 사고가 새로운 항목으로 추가되었다. 이전에는 건강관련 사고가 “기타(miscellaneous)”

로 분류되었지만 CWIF는 이 항목이 풍력산업 사고범주에 속하는 것으로 간주하였다. 이 항목에는 터빈소음, 블레이드 회전으로 인한 깜박거림 등으로 정서적 불안과 건강악화등과 같은 건강재해가 포함되었다. 풍력터빈이 거주지 주택과 가까운 장소에 설치될 경우 이 항목의 사고 횟수가 상당히 증가할 것으로 예측하였다.

- ④ 블레이드 파손(Blade failure): 블레이드 파손에 의한 사고는 보고된 사고 중 기타 사항을 제외하고 가장 많은 사고 횟수로 나타났다. 블레이드 파손은 여러 원인에 의해 발생하였으며, 블레이드 전체 또는 일부가 터빈에서 분리되기도 하였다. 총 370건의 블레이드 개별 사고가 보고되었다. 블레이드 파손에 의해 파편조각이 최대 1600 m (1 mile) 까지 날아 간 적도 있다. 독일에서는 블레이드 파편조각이 근처 건물의 지붕과 벽을 통과한 경우도 있었다. CWIF는 공공 안전과 소음 및 블레이드 회전에 의한 그림자의 깜박거림(shadow flicker)을 비롯한 기타 문제를 해결하기 위해 터빈과 주택 사이의 거리가 최소 2 km 정도는 유지해야 할 것을 제시하였다.
- ⑤ 화재사고(Fire): 화재사고는 보고된 자료 중 기타사고를 제외하고 두 번째 많은 순서로 발생하였다. 화재는 여러 가지 원인에 의해 발생되었으며 일부 터빈구조물 형태는 다른 구조의 형태보다 더 많이 발생하였다. <표 2-1>에서와 같이 총 298건의 화재 사건이 보고되었다. 2015년 11월, 전 세계의 유틸리티 규모 프로젝트에 대한 신재생 에너지 보험기관인 GCube에 의하면 연간 평균 50개의 풍력터빈 화재가 발생하는 것으로 보고되었다.<sup>(8)</sup> 이 자료는 CWIF 데이터의 두 배가 넘으며 여기에 제시된 데이터는 단지 일부분인 것으로 여겼다. 터빈화재의 가장 큰 문제점은 터빈 타워의 높기 때문에 소방대원이 거의 접근할 수 없으며, 화재 현장을 단지 지켜 볼 수밖에 없는 경우도 있었다. 폭풍우에 화재가 발생할 경우에도 진압이 곤란하다. 건조한 날씨에는 넓은 지역에 걸쳐 화재가 발생할 위험이 높다. 특히 산림지역에서는 풍력발전기 인근에 건설된 주택과 가까운 곳의 화재 위험도 있다. 화재 사고로 인해 풍력산업 근로자가 심하게 불에 타 사망한 경우도 4건이 있었다.
- ⑥ 구조물 파손(Structural failure): 구조물 파손은 기타사항을 제외하고 사고 순위가 세 번째로 높으며 <표 2-1>에서와 같이 총 189회의 사고가 발생하였다. “구조물 파손”은 기계 구조물 부품이 견딜 수 있도록 설계된 조건에서도 고장이 발생한 경우이다. 이러한 파손은 주로 폭풍으로 인한 풍력터빈의 파손과 풍력타워 붕괴와 관련이 있다. 한편으로 열악한 품질관리, 유지보수 관리의 소홀 및 구성요소 결함도 원인으로 나타났다. 구조적 파손에 의한 고장은 블레이드의 고장보다 경제적 손실이 훨씬 더 크지만, 풍력터빈은 주로 주거 지역에 떨어져 특정 지역에 설치되어 있기 때문에 인명사고 위험은 다소 낮게 나타났다. 그러나 소형 풍력터빈이 학교를 비롯한 인구가 밀집된 건물주변에 설치되면 사고빈도가 증가할 것으로 예상하였다.
- ⑦ 동결에 의한 얼음조각 비산 사고(Ice throw): 얼음조각 파편의 비산에 의한 사고가 총 39건이 보고되었다. 일부는 여러 사고와 겹쳐 발생하였으며, 여기의 사고 횟수는 사람에게 부상을 입히지 않았던 자료이다. 얼음 파편에 의해 부상당한 경우는 ②항의 부상(human injury) 자료에 포함시켰다. 얼음조각이 140 m까지 비산된 경우도 있었

다. 캐나다 일부에서는 풍력터빈 가동 시 동결 기간 동안에 사람은 풍력터빈으로부터 최소한 305 m 거리를 유지하라는 경고표지판을 게시하고 있다. 2003년에 발표된 보고서<sup>(9)</sup>에 따르면 1990년에서 2003년 사이에 독일에서만 880건의 빙결에 의한 사고가 보고되었다. 이들 중 약 33%가 저지대 및 해안선 부근에서 발생하였다.

- ⑧ 수송에 의한 사고(Transport): <표 2-1>에서와 같이 조사기간 동안 총 177건의 수송(운송)사고가 발생되었다. 풍력터빈 수송도중 45 m의 터빈 구조물이 주택에 충격을 가하고, 풍력터빈 기둥인 타워가 식당에 충돌하여 건물이 파손되었으며, 여러 종류의 터빈 구조물이 도로에 낙하하여 주요 고속도로를 차단하는 사고도 있었다. 수송에 의한 사망자와 인명 부상은 항목에 포함시켰다. 대부분의 사고는 수송차량 운행 중 낙하되는 터빈 구조물 부품으로 인하여 발생하지만, 일부 터빈구조물은 길이가 50 m인 £50M 바지선과 함께 수송도중 해상에서 분실된 경우도 있었다. 수송 사고는 많은 인명 피해와 부상을 입힐 수 있는 가장 큰 원인 중 하나이다.
- ⑨ 환경사고-조류 충돌포함(Environmental damage including bird deaths): <표2-1>에서와 같이 조사기간 동안 총 212건의 환경피해 사례가 보고되었으며, 이는 2007년 이후 대다수 사고가 발생되었다. 이러한 이유는 환경에 관한 규정과 법이 변경되었거나 또는 새롭게 제정된 규정 때문일 수 있다. 모두가 야생 동물이 현장에서 사고를 당하여 죽게 된 경우이다. 이들 중에 66건은 풍력터빈에 의해 보호 조류가 죽은 경우이다. 그러나 야생동물의 죽은 사고 횟수는 훨씬 더 많은 것으로 추측된다. 20년 동안 알타몬트 패스(Altamont Pass) 풍력단지에서만 2,400마리의 보호 조류인 황금독수리(golden eagle)가 죽었으며, 약 1만 마리는 보호 중인 맹금류(protected raptor)이다. 독일에서는 보호 조류인 흰 꼬리독수리(white tailed eagle)가 풍력터빈에 의해 32마리가 죽었다. 호주에서는 멸종 위기에 놓인 보호조류인 태즈메이니아 독수리(Tasmanian eagle)가 울노스(Woolnorth) 한 곳의 풍력단지에서 22마리가 죽었다.<sup>(10)</sup> 한편으로 미국에서는 2012년 한해에 60만 마리의 박쥐가 풍력터빈에 의해 죽은 것으로 추정된다. 미국의 풍력발전 비율이 20%에 도달하면 연간 1.4백만 마리의 조류가 죽게 될 것으로 예상하였다. 호주의 맥아더(MacArthur) 풍력발전 단지에 의해 1500마리의 새가 매년 사멸될 것으로 추정하며, 그 중 500마리는 특별한 보호 조류인 맹금류(raptor)이다.
- ⑩ 기타사고(Other: miscellaneous): 기타 사고가 조사기간 동안 총 417건이 보고되었다. 구조적 손상이 없는 작동 부품의 고장이나 다른 기계고장도 여기에 포함된다. 또한 유지보수 태만, 전기고장(화재 또는 감전사가 아닌 고장)로 인한 사고 등도 여기에 해당된다. 건설 및 시설공사 중에 발생한 사고도 포함되며 낙뢰로 인해 블레이드 손상이나 화재가 발생하지 않은 경우에도 이 사고에 포함시켰다. 독일에서만 1992년에서 1995년까지 낙뢰에 대한 393건의 사고가 발생하였으며, 나머지 124건은 배전망 사고에 관련된 것이다.<sup>(11)</sup>

### 2-3. 세계 풍력발전기 사고 종류와 비율

풍력발전기에서 발생한 사고 자료는 <그림 2-1>과 <표 2-1>에 나타낸 것처럼 1996

년부터 2017년 5월 31까지 21년 5개월 동안 발생되었던 총 2,089건에 대한 자료이다. 이 기간 동안에 발생한 사고를 유형별로 정리하여 <표 2-2>에 나타내었다.

<표 2-2> 세계 풍력발전기 사고 종류와 비율(1996년부터 2017.5.31.현재)<sup>(5)</sup>

Failure Type	*Total numbers	Occurence (%)
① Fatal accidents	132	6.3
② Human injury	154	7.4
③ Human health	102	4.9
④ Balde failure	370	17.7
⑤ Fire	298	14.3
⑥ Structural failure	189	9.0
⑦ Ice throw	39	1.9
⑧ Transport	177	8.5
⑨ Environmental damage	212	10.1
⑩ Other (miscellaneous)	416	19.9
Total	2,089	100.0

\*사고종류 횟수 합계: <표 2-1>의 우측 마지막 행의 합계 숫자와 동일.

사고 중에서 가장 많은 빈도수를 차지한 것은 기타를 제외하고 블레이드의 파손(17.7%)이며, 다음으로 화재로 인한 사고(14.3%), 환경사고(10.1%), 구조물 파손(9.0%), 수송에 의한 사고(8.5%) 등의 순서이다.

풍력발전기에서 가장 빈도가 높은 항목은 기타사고를 제외하고 블레이드 파손에 의한 사고이다. 블레이드는 길이가 긴 고속회전체로서 풍력발전기에서 가장 중요한 설비중의 하나이다. 블레이드의 손상이 발생한 경우 공력성 저하로 인한 발전 성능이 저하하고 안전사고에 의한 피해가 발생한다. 블레이드는 보통 25rpm의 회전속도로 일 년에 수백만 번 회전하며, 비행기가 이륙하는데 필요한 힘과 같은 크기를 가진 바람이 충돌하게 된다. 블레이드의 길이는 보잉 747기의 날개 길이와 비슷하고, 상공을 운행하는 비행기와 달리 풍력발전기는 대지와 가깝게 건설되므로 강력한 난류가 존재한다. 따라서 이러한 가혹한 운전조건으로 인하여 블레이드에 피로균열이 발생할 수 있다. 특히 대부분의 블레이드 소재는 경량화 및 비강성 등의 이유로 GFRP로 만들어져 있으므로 피로에 취약한 특성을 갖는다.<sup>(12)</sup>

사고 유형 중 두 번째로 빈도수 높은 것은 기타사고를 제외하고 화재로 인한 사고이다. 풍력발전기는 무인으로 24시간 가동되기 때문에 항상 화재의 위험에 노출되어 있다. 화재 발생 원인으로 너셀(nacelle) 내부 기계장치의 화재, 윤활제에 의한 화재 발생 등이 있지만 원인이 알려진 화재 중에서 낙뢰에 의한 화재 발생비율도 높은 편이다. 기계장치에 의한 화재 발생은 과전류가 발생하거나 누전에 의한 스파크 발생 또는 과열된 기계장치에 의해 점화되는 경우 등이다. 또한 강풍에 의해 풍력발전기가 과속되어 기계

부품의 과열을 유발시켜 화재가 발생하였다.<sup>(13)</sup>

환경피해는 기타사고를 제외하고 세 번째로 사고비율이 높으며 2007년 이후 대다수 사고가 발생되었다. 이는 환경에 관한 규정과 법이 2007년을 기준으로 변경되었거나 또는 새로 제정되었기 때문일 수 있다. 모두가 야생 동물이 현장에 피해를 당해 죽게 된 경우이다.

구조적 손상은 블레이드 이외의 부분에 대한 손상으로 로터손상과 타워손상이 대부분을 차지한다. 풍력발전기의 로터에 작용하는 불균형한 반복 하중은 풍력터빈을 구조적으로 불규칙하게 작동되도록 한다. 이러한 하중이 지속적으로 누적되면 기계부품이 피로에 의해 파손되고 수명 단축을 일으키기 때문에 로터 및 타워 사고의 주원인이 된다. 최근에는 이러한 구조적 하중을 저감시키고 풍력발전기의 작동 수명 연장에 효과가 있는 다양한 피치제어 방법들이 연구되고 있다.<sup>(14)</sup> 그밖에도 기계 부품의 파손과 전기장치의 손상 등 주로 풍력발전기의 기계 및 전기관련 설비에서 발생한 사고로 알려졌다.

### 3. 미국 풍력발전기 안전과 고장 비율

#### 3-1. 안전 필요성

미국에서도 탄소배출 감축량을 늘리고 신재생에너지 비중을 높이기 위한 청정 전력 계획을 2005년 대비 당초 30%였던 계획량을 32%로 상향 조정하였으며, 또한 풍력, 태양광 같은 재생에너지 발전 비중을 당초의 목표치인 22%에서 2030년도까지 28%로 상향조정했다.<sup>(15)</sup> 이러한 이유로 신재생 에너지관련 산업 개발을 지속적으로 추진 중에 있으며, 이와 병행하여 풍력발전에 관한 연구도 활발히 진행하고 있다.

신뢰성 있는 풍력터빈을 설계하기 위해서는 강풍과 같은 위험하고 위태로운 조건에서 손상모드(failure mode)가 식별될 수 있어야 한다. 풍력터빈의 설계수명은 약 20년이며, 이 기간 동안 위험한 폭풍우에도 불구하고 안정적이고 안전하게 작동되어야 한다. 일반적으로 자동차 엔진은 약 5,000시간 동안 작동하도록 설계된 반면, 풍력 터빈은 간헐계수(intermittence factor)가 0.40일 경우 아래의 식과 같이 약 70,000시간 이상 가동되어야 한다.<sup>(16)</sup>

$$20 \text{ years} \times 365.12 \frac{\text{days}}{\text{year}} \times 24 \frac{\text{hours}}{\text{day}} \times 0.40 = 70,103 \text{ hours.}$$

대형 풍력발전은 환경위험 및 위해성이 있는 산업설비에 속한다. 여기에는 회전하는 기계적장치의 위험뿐만 아니라 전기장비의 위험도 포함된다. 풍력터빈 블레이드는 탑이 144-288 km/h (90-180 mph)에 달하는 고속으로 회전한다. 동절기 동안 대형터빈에서 얼음 덩어리가 비산될 수 있으며, 소형터빈에서는 블레이드가 분리될 수 있다. 풍력발전기는 관련된 위험을 최소화하기 위해 지역, 국가 또는 국제적으로 제정된 규정과 법에 따라 학교 건물이나 집단 거주지에 떨어진 위치에 설치해야 한다.



### 3-2. 위험 요소와 고장분포

풍력발전 산업으로 인한 인명사고나 심각한 부상을 당한 사고 횟수는 많은 편은 아니나, 에너지 생산량이 높기 때문에 다른 산업에 비해 상대적으로 사고 비율이 높은 편이다. 풍력발전에 관련된 위험 및 재해요소는 다음과 같다.



<그림 3-1> 전기장치 누전, 마찰 과열로 인한 화재(2004년에 독일에서 발생 출처: DPA의 Der Spiegel)<sup>(16)</sup>

① 블레이드 파손 및 이탈(ejection), ② 터빈기능 고장 분리(runaway turbine disintegration), ③ 타워붕괴, ④ 발전기와 변속기의 윤활유 및 냉각유체 과열로 인한 화재(<그림 3-1> 참고), ⑤ 강풍 등 위험한 날씨 조건, ⑥ 고공(약 100 m 이상)에서 작업, ⑦ 회전 기계장치 사용, ⑧ 중장비 사용, ⑨ 고전압 전기 및 케이블 사용, ⑩ 특수차량 접근, ⑪ 낙뢰로 인한 화재, ⑫ 회전자(rotor) 제조 시 유해한 솔벤트 등 화공물질에 노출, ⑬ 기름 유출, ⑭ 동결기간 중 얼음파편 비산 등과 같은 사고 요소로 분류한다. 풍력발전 사고의 대부분은 유지보수의 소홀과 성급히 작동시키기 위해 지켜야 할 안전수칙을 무시하여 발생하였다.

<표 3-1>과 <표 3-2>는 250대의 풍력발전기를 35 m/s 속도의 강풍에 10 분간 노출시켜 발생된 고장 형태(failure type)와 고장 메커니즘(failure mechanism)에 관한 분포 비율을 나타낸다. 가장 높은 파손 형태는 <표 3-1>에 보인 바와 같이 요각제어장치 고장(36%)이고, 다음으로 타워 및 나셀 붕괴(15%)와 허브 파손(15%), 블레이드 팁 손상(12%), 베어링

및 기어박스 고장(10%) 순서로 발생하였다. 고장 메커니즘은 <표 3-2>에서와 같이 정적 과하중(28%), 피로하중(21%)과 불충분한 전력조정(21%)에 의한 고장 순서로 발생하였다.

<표 3-1> 35 m/s 강풍에 10 분간 노출된 풍력발전기 250대의 고장 분포<sup>(16)</sup>

Failure Type	Occurrence (%)
Total tower and nacelle collapse	15
Blade root failure	3
Blade tip failure	12
Blade buckling	6
Blade stay failure	3
Bearing and gearbox failure	10
Hub failure	15
Yaw control failure	36
Total	100

<표 3-2> 35 m/s 강풍에 10 분간 노출된 250대의 풍력발전기 고장 메커니즘<sup>(16)</sup>

Failure Mechanism	Occurrence (%)
Fatigue loadings	21
Static loads	28
Under designed mechanical/aerodynamic brakes	11
Insufficient power regulation	21
Miscellaneous causes	19
Total	100

풍력발전 단지 주위에는 고전압 전기 케이블이 설치되어 있기 때문에 다른 산업 현장과 마찬가지로 위험 사항을 공지하고 관광 등 일반적인 목적으로는 대중의 접근을 제한해야 한다.

풍력발전 설비의 안전한 작동기간은 로터 블레이드의 피로 파손으로 인하여 일반적으로 20년으로 제한하고 있다. 치명적인 손상과 사고를 방지하기 위해 다음과 같은 예방조치가 선행되어야 한다. 즉, ① 특별히 훈련받은 작업자가 정비 및 수리를 해야 하고, ② 제조된 부품의 품질이 신뢰성이 있어야 하며, 유지 보수 및 수리 정비관리가 정기적으로 지속되어야 한다.

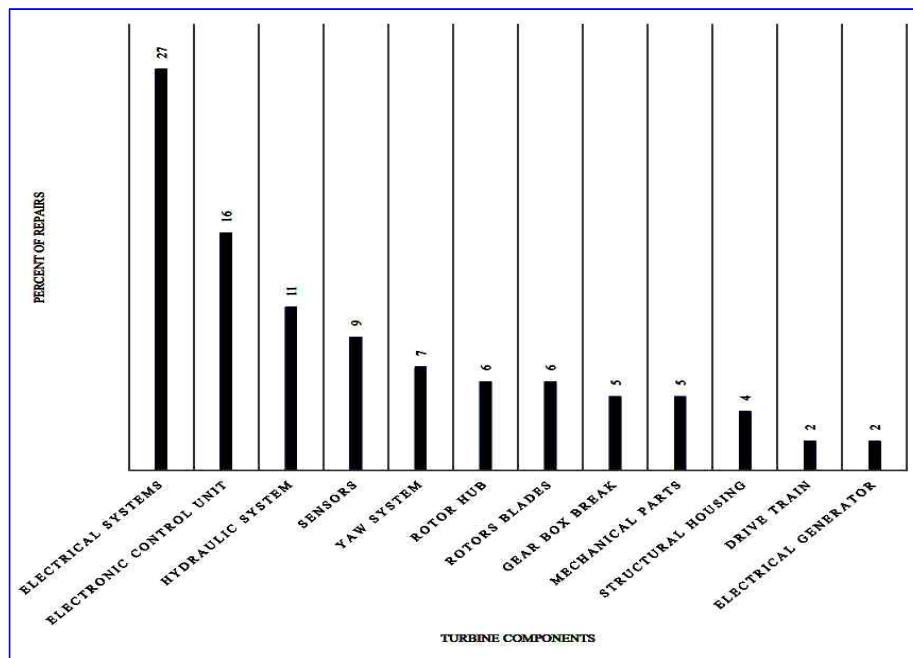
모든 형태의 풍력발전기의 치명적인 고장은 불완전한 안전장치로 인하여 발생하며, 안

전관련 장치가 발전기의 가장 중요한 구성 요소이다.

### 3-3. 유지보수 및 시험

대형 풍력터빈 발전시설의 유지보수는 규정된 절차에 따라 적절히 수행되어야 한다. 대부분의 고장은 전기 및 전자제어 장치와 센서 기구에서 발생한다. 기계적 고장은 발생 빈도가 낮은 편이지만 풍력터빈 발전의 정지 시간에 심각한 영향을 끼친다.

<그림 3-1>은 미국 풍력협회(AWEA: American Wind Energy Association)에서 발표한 유틸리티 규모의 풍력 터빈에서 필요한 수리 및 유지 보수 비율<sup>(16)</sup>을 나타낸다. 이 그래프에서 보인 바와 같이 전기시스템 수리(27%), 전자 제어장치 수리(16%), 그리고 유압시스템 수리(11%)가 높은 비율로 나타났다. 풍력터빈 발전장치에서 로터 블레이드와 구성요소에 대한 시험 절차를 준수해야 하며, 대규모로 설치하기 전에 국공립기관이나 또는 대학 실험실에서 풍력터빈 시제품을 실제의 환경 조건으로 시험하는 절차를 거쳐야 한다.



<그림 3-1> 유틸리티 규모의 풍력 터빈에서 필요한 수리 및 유지 보수 비율<sup>(16)</sup>

풍력터빈 발전설비는 안정적이고 안전한 설계를 통해 인증과정을 거쳐 제조되어야 한다. 전문학회 또는 엔지니어링 협회에서는 풍력터빈 발전기의 안전에 관련된 문제점을 검토하고 의견을 제시해야 한다. 유럽 또는 캘리포니아 지역에서 만족스럽게 작동한 풍력발전기가 미국의 중서부 또는 동부 해안의 기후 환경, 예를 들면 결빙 또는 폭풍 상태에서는 동일한 방식으로 작동되지 않을 수 있다.

예상치 못한 문제는 시험과정을 거쳐 해결될 수 있었다. 예를 들어 초기의 MOD-1 USA

풍력터빈 설계<sup>(17)</sup>는 주변 가옥의 창문을 덜컹 거리게 하는 소음과 가청진동(audible vibration)을 발생시켰다. 이 진동은 주파수가 1.2 Hz로, 로터와 타워 사이의 상호 작용으로 매 회전 시 2 개의 펄스의 생성으로 인하여 발생하였다. 이 문제점은 진동효과를 줄이기 위해 블레이드 속도를 낮추고, 강재(steel)로 된 블레이드를 유리섬유 블레이드(fiberglass blade)로 교체하여 해결되었다.

유틸리티 규모의 풍력발전(utility scale wind power production)은 내재된 위험과 위해 요소로부터 일반인뿐만 아니라 근무하는 작업자도 보호해야 하는 산업설비로 분류하고 있다. 또한, 전문가들은 이러한 위험을 투명한 정보공개를 통해 일반인 들이 수용할 수 있도록 설계단계에서 최소화할 것을 강조했다.

특히 풍력발전기를 비경제적 목적으로 사용하거나 거주지나 인구가 밀집된 곳에 설치하는 것은 배제해 있다. 이는 주로 윤리적 사항을 고려한 것이며, 부차적으로 사회조직이나 환경단체가 풍력발전기의 불안전이나 신뢰할 수 없는 이유로 설치에 반대하면 풍력산업 전체가 붕괴될 위험에 처할 수 있기 때문이다.

풍력 에너지가 풍부하고 재생가능하며 환경 친화적인 에너지원으로 널리 보급됨으로써 사회와 인류에게 기여할 수 있는 이익은 폭 넓게 공개된 정보에 의해 풍력발전에 의해 발생할 수 있는 위험을 지역사회가 수용하고 동의하며, 안정적이고 안전한 전력 생산형태에 달려 있다

#### 4. 국내 풍력발전기 고장사고 현황과 대책

국내에서는 풍력발전기 고장과 사고로 인해 정지된 건수가 2016년 11월 현재까지 60건에 달하며, 대부분은 외국산 터빈이 설치된 풍력발전기에서 발생한 것으로 조사되었다.<sup>(18)</sup> 특히 현재까지 발생한 총 60건의 풍력발전기 사고(정지) 내역을 분석한 결과, 50건(약 83.3%)은 외국산 터빈을 사용하는 풍력발전기에서 발생한 사고였다.

국내 풍력발전기 사고 및 정지 현황(60건)을 사유별로 살펴보면, 부품 손상에 의한 가동정지가 55건으로 가장 많았다. 다음으로 부품 마찰로 인한 과열로 나셀의 화재 발생 4건, 그리고 타워파손으로 인한 풍력발전기 전복 1건(<그림 4-1> 참고)<sup>(19)</sup> 순서로 나타났다. 또한 국내 풍력발전기 국산화율 역시 아직 저조한 것으로 조사되었다. 자료<sup>(18)</sup>에서 풍력발전 산업의 주요 문제점을 다음과 같이 제시하였다. ① 국내 풍력발전단지 10곳 중 3곳 이상은 외국산 제품의 풍력터빈이 설치되었다. ② 국내 풍력발전기의 누적설치용량 기준에 의하면, 외산 제품이 절반 이상인 58%에 달하였다. ③ 국내 풍력발전기 시스템설계 및 개발 국산화율 54.4%에 불과하였다. 이 자료에서 국내에 설치된 국내 풍력 발전기에 대한 정부차원의 정기적인 안전성 및 효율성 검사를 실시하고, 풍력을 포함한 신재생에너지 기술수준 향상과, 국산화율 제고를 위해 세부 부품별 국산화율 조사가 포함될 완성도 높은 용역사업을 2년마다 정기적으로 추진할 것을 제시하였다.



<그림 4-1> 강원도 태백 삼수동의 풍력발전기 타워의 접합부분 분리사고 현장 (우측하단: 사고 난 태백풍력 7호기의 절단면)<sup>(19)</sup>

## 5. 결 론

본 분석물에서 조사하고 분석한 주요 사항은 다음과 같다.

첫째, CWIF에서 최근 발표한 풍력발전기 사고 유형<sup>(5)</sup>을 종류별, 원인별 그리고 연대별로 분류하여 분석하였다. 1996년부터 2017년 5월 31까지 21년 5개월 동안, 세계적으로 발생한 풍력발전기 관련 사고는 이 자료에서 총 2,089건이 발생한 것으로 나타났다. 가장 많은 빈도수를 차지한 것은 분류되지 않은 기타사고를 제외하고 블레이드의 파손에 의한 사고(17.7%)이며, 다음으로 화재사고(14.3%), 환경사고(10.1%), 구조물 파손(9.0%), 그리고 수송에 의한 사고(8.5%) 등의 순서이다. 이 자료에서는 상해 부상과는 별도로 보건 재해와 야생동물의 죽음과 같은 환경사고를 별도로 분류하여 통계숫자로 제시한 점이다. 국내에서도 안정적이고 안전한 신뢰성이 높은 풍력발전기를 개발하고 관련 산업을 발전시키기 위해서는 풍력발전 산업을 담당하는 공공기관 또는 정부 담당부서에서는 풍력산업 관련사고 종류와 통계자료를 확보하고 분석해야 할 것이다.

둘째, 미국 풍력협회(AWEA) 자료에 의하면 유틸리티규모의 풍력터빈에서 수행된 수리 및 유지보수 비율이 높은 순서는 전기시스템 수리(27%), 전자제어장치 수리(16%), 그리고 유압시스템 수리(11%)로 나타났다.<sup>(16)</sup> 이 자료에 의하면 전기시스템 및 전자제어장치의 수리가 43%를 차지하므로, 기계장치와 더불어 이들 시스템도 가혹한 환경조건에서 견딜 수 있도록 설계하고 제조해야 할 것이다. 또한 풍력발전 산업에 관련된 환경위험 및 위해요소에 관한 정보를 공개하고 지역사회 주민의 동의를 얻어 안정적이고 안전한 전력 생산을 할 것을 제시하였다.

마지막으로, 국내의 풍력발전 사고는 자료<sup>(18)</sup>에 의하면 60여건(2016. 11기준)이 발생하였

다. 사고별로 살펴보면, 부품 손상에 의한 가동정지가 55건으로 가장 많았고, 다음으로 부품 마찰로 인한 과열로 나셀의 화재 발생 4건, 그리고 타워파손으로 인한 풍력발전기 전복 1건 순서로 나타났다. 이 자료에서는 전국에 설치된 국내 풍력단지에 대한 정부차원의 정기적인 안전성 및 효율성 검사를 실시하고, 풍력을 포함한 신재생에너지 기술수준 향상과, 국산화율 제고를 위해 세부 부품별 국산화율 조사가 포함된 완성도 높은 용역사업을 2년마다 정기적으로 추진할 것을 제시하였다.

본 분석 자료에서 세계적으로 풍력발전단지에서 발생하는 사고와 고장에 대해 CWIF와 AWEA, 그리고 국내에서 발표된 자료를 바탕으로 사고유형과 통계자료를 분석하였으며, 본 자료를 활용한다면 풍력발전기 개발과 제조 및 설치 시에 사고 예방과 안전 점검에 도움이 될 것으로 예상된다.

## 후 기

본 분석물은 KISTI ReSEAT 프로그램에서 지원하는 중소기업 기술멘토링 공동관심기술(풍력분과)의 한 과제로 군산대학교 복합재료연구실의 장윤정 연구원(박사과정)이 제공한 일부 자료<sup>(3-5,7,16)</sup>를 참고하여 작성하였으며 이에 감사한다.

### <참고문헌>

1. Wind turbine, From Wikipedia, the free encyclopedia, 2017, [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine)
2. Wind turbine, From Wikipedia, the free encyclopedia, 2017, [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine#/media/File:EERE\\_illust\\_large\\_turbine.gif](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine#/media/File:EERE_illust_large_turbine.gif)
3. CME Robinson, ES Paramasivam, EA Taylor, AJT Morrison and ED Sanderson, "Study and development of a methodology for the estimation of the risk and harm to persons from wind turbines", HSE(Health and Safety Executive), UK, 2013, <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr968.pdf>
4. Wind Turbine Accident and Incident Compilation, 2017, <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/fullaccidents.pdf>
5. Summary of Wind turbine accident data to 31 May 2017, <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/accidents.pdf>
6. Edward Malnick and Robert Mendick, "1,500 accidents and incidents on UK wind farms", 11 Dec 2011, The Telegraph, <http://www.telegraph.co.uk/>
7. C. M. E. Robinson, E. S. Paramasivam, A. J. T. Morrison, E. D. Sanderson, "Study and development of a methodology for the estimation of the risk and harm to persons from wind turbines", RR968 Research Report, 2013, Health and Safety Executive 2013 <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr968.pdf>
8. GCube Tackles Turbine Fires, 17th November 2015, GCube Underwriting Ltd., <http://www.gcube.co.uk/>

- [p://www.gcube-insurance.com/en/press/gcube-tackles-turbine-fires/](http://www.gcube-insurance.com/en/press/gcube-tackles-turbine-fires/)
9. M Durstwitz, “A Statistical Evaluation of Icing Failures in Germany’s ‘250 MW Wind’ Programme - Update 2003, BOREAS VI 9-11 April 2003 Pyhänturi, Finland.
  10. Covering up the massacre, June 4, 2015, <https://wcfm.org/2015/06/04/covering-up-the-massacre/>, Eagles and wind farms: mortality statistics, <http://www.iberica2000.org/Es/Articulo.asp?Id=3071>, <http://www.iberica2000.org/Es/Articulo.asp?Id=1875>
  11. M Durstewitz, et al, Data from WMEP database: taken from report “External Conditions for Wind Turbine Operation - Results from the German ‘250 MW Wind’ Programme”, European Union Wind Energy Conference, Goeteborg, May 20-24, 1996.
  12. Gui-Shik Kim\* and Ji-Hyun Jeong, “A Classification on the Causes of Wind Turbine Accidents”, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 76-81, August 2015.
  13. D. H. Kim and J. H. Lim, “A Study on the Early Fire Detection based on Environmental Characteristics inside the Nacelle of Wind Turbine Generator System”, Journal of Korean Society Precision Engineering, Vol. 31, No. 9, 2014, pp. 847-854.
  14. G. E. Jeon, T. S. No and G. S. Kim, “Design of Individual Pitch Control and Fatigue Analysis of Wind Turbine”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 38, No. 1, 2014, pp. 1-9.
  15. 미국, 풍력·태양광 신재생에너지 발전 목표 상향조정, 아주경제뉴스(2015. 8. 5), <http://blog.naver.com/lizensup?Redirect=Log&logNo=220441816530>
  16. M. Ragheb, “Safety of Wind Systems”, 2016. 6. 10, <http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Safety%20of%20Wind%20Systems.pdf>
  17. N. D. Kelley, H. E. McKenna, R. R. Hemphill, C. L. Etter, R. L. Garrelts, N. C. Linn, “Acoustic Noise Associated with the MOD-1 Wind Turbine: Its Source, Impact, and Control”, SERI/TR-635-1166, UC Category: 60, DE85002947, February 1985, [https://docs.wind-watch.org/Kelley-et-al\\_-Noise-MOD-1-wind-turbine-source-impact-control.pdf](https://docs.wind-watch.org/Kelley-et-al_-Noise-MOD-1-wind-turbine-source-impact-control.pdf)
  18. 김정훈의원실 국정감사 보도자료(국내 풍력발전기 고장사고 정지 60건, 철거된 풍력기만도 10호기에 달해! 20161102).hwp, 2016, <http://www.gukjenews.com/news/articleView.html?idxno=573463>
  19. 네이버뉴스, “연결 부위 ‘동강’, 태백 풍력발전기(2016. 3. 6.)”, <http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=102&oid=003&aid=0007080454>

## &lt;관련기술목록&gt;

1. Chou, J.-S., Chiu, C.-K., Huang, I.-K., Chi, K.-N. "Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads", Engineering Failure Analysis, Volume 27, January 2013, pp. 99 - 118.
2. Gong, Y. , Fei, J.-L. , Tang, J., "Failure analysis on abnormal wear of roller bearings in gearbox for wind turbine", Engineering Failure Analysis, Volume 82, December 2017, pp. 26 - 38.
3. P.J. Tavner, D. M. Greenwood, M. W. G. Whittle, R. Gindele, S. Faulstich, B. Hah, "Study of weather and location effects on wind turbine failure rates", Wind Energy, Volume 16, Issue 2, March 2013, pp. 175-187.
4. Frede Blaabjerg, Ke Ma, "Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 1, No. 3, 2013, pp. 139-152.
5. Chia Chen Ciang, Jung-Ryul Lee and Hyung-Joon Bang, "Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods", Meas. Sci. Technol. 19, 2008 (122001), pp. 1-20.
6. Jui-Sheng Chou, Chien-Kuo Chiu, I-Kui Huang, Kai-Ning Chi, "Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads", Engineering Failure Analysis, Volume 27, January 2013, pp. 99 - 118.
7. Shatjit Yadav, M. Ramachandran, "Analysis of Optimized Wind Turbine Failure Using Computational Fluid Dynamics", Materials Today: Proceedings, Volume 4, Issue 2, Part A, 2017, pp. 1788-1793
8. Jui-Sheng Chou, Wan-Ting Tu, "Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower", Engineering Failure Analysis, Volume 18, Issue 1, January 2011, pp. 295-313
9. M D Reder, E Gonzalez and J J Melero, "Wind Turbine Failures - Tackling current Problems in Failure Data Analysis", Journal of Physics: Conference Series 753 (2016) 072027, pp. 1-11.
10. Silvio Simani, Saverio Farsoni, Fault Diagnosis and Sustainable Control of Wind Turbines, 1st Edition Paperback ISBN: 9780128129845, Butterworth-Heinemann, 1st January 2018, pp. 1-200.

이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.