

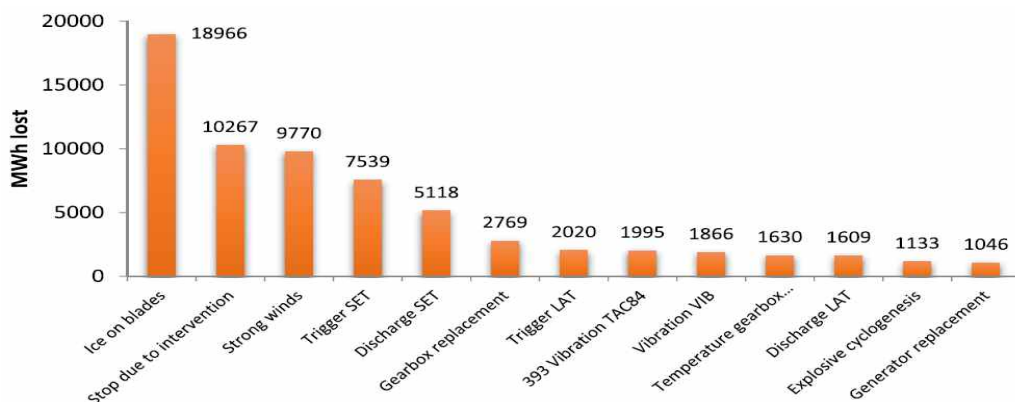
# 풍력터빈 블레이드의 얼음 부착 대응 기술

한국과학기술정보연구원  
 전문연구위원 이홍원  
[hongwlee@reseat.re.kr](mailto:hongwlee@reseat.re.kr)

## 1. 머리말

근래에 들어 각국은 온실가스 감축을 위한 신재생에너지 확대 방향의 하나로 풍력단지(wind farm) 건설에 박차를 가하고 있다. 일반적으로 풍력단지는 바람 자원이 풍부한 높은 지대에 설치되고 있으며, 또한 지역별로는 북반부 지역이 타 지역에 비해 기온이 낮아 공기밀도로 높고 이에 따라 대략 10%의 바람에너지를 더 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 이와 같은 지역에 설치된 풍력단지는 대부분 풍력터빈(wind turbine)의 로터 블레이드(rotor blade)에 얼음이 부착되는 착빙 현상(icing event)으로 인해 발전 손실, 설비고장, 가동정지, 안전사고 등 운용상의 어려움을 겪고 있다(그림2-1).

이러한 블레이드의 착빙 현상에 관한 분석 및 대응의 사례로 스페인의 ‘IcingBlades 프로젝트’<sup>(1)</sup>를 들 수 있다. 이 프로젝트는 517기의 풍력터빈(전체 설치용량 682MW)에 대한 분석을 통해 29개월 동안 블레이드 착빙 현상으로 18,966MWh의 전력손실이 발생했다고 보고했다. 또한 블레이드 착빙 현상이 모든 발전 손실 요인 중 가장 큰 요인이라고 분석했다(그림 1-1). 이와 같은 배경에서 풍력단지의 정상 운용을 위해서는 얼음부착을 방지하는 착빙방지(anti-icing) 장치와 축적된 얼음제거(de-icing) 장치를 포함하는 얼음방재시스템(IPS: Ice Protection System)의 개발과 활용이 필요하다. 다음은 풍력터빈의 착빙 현상 및 문제를 기술하고 IPS 기술과 이들 기술들에 대한 비교 분석(시장, 기술 및 비용) 결과를 소개한다.



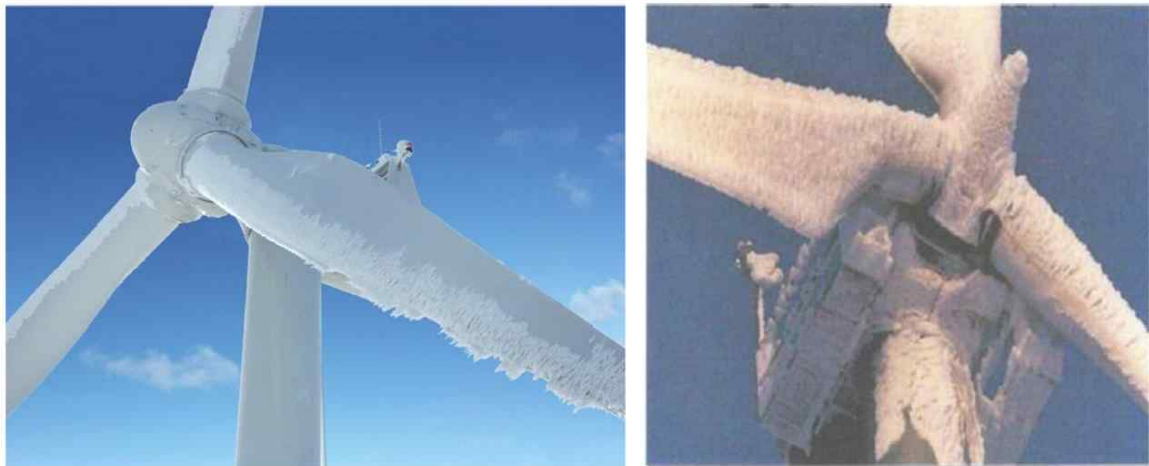
〈그림 1-1〉 각 풍력발전에서의 요인별 전력손실<sup>(2)</sup>

## 2. 풍력터빈의 착빙 현상과 이에 따르는 문제

### 2-1. 얼음의 생성 및 축적

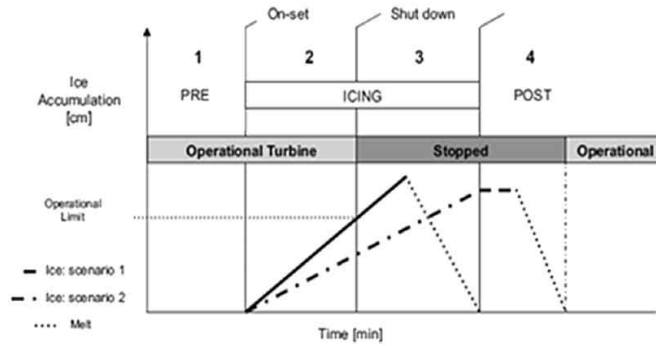
<그림 2-1>과 같은 풍력터빈의 로터 블레이드에 부착되는 얼음은 주위 공기의 온도, 풍속, 상대습도, 공기밀도와 같은 기상 조건에 크게 영향을 받아 생성된다. 착빙의 종류에 대해서는 일반적으로 운중착빙(In-cloud icing), 강수(precipitation), 서리(hoar frost)로 분류한다.

운중착빙은 대기온도가 0℃ 밑이고 습도가 높을 때 일어난다. 과냉각된 물방울이 구조물의 표면에 부딪쳐 충격되는 순간 동결하고 이런 얼음 층들이 축적된다. 강수는 대기 중의 수분이 액체 또는 고체가 되어 지표면에 낙하하는 현상을 말하며 차가운 표면이나 젖은 눈 위에 비가 동결되는 현상이다. 서리는 수증기가 차가운 표면에서 고체화되는 현상을 말하며 서리가 쌓여 형성된 성애가 풍력터빈에 있어서 핵심 착빙 현상이라고 할 수 있다. 성애는 풍력터빈의 전체에 쌓이지만 입사속도(incident velocity) 때문에 블레이드의 리딩에지(leading edge, 전연)로부터 부착되기 시작한다.



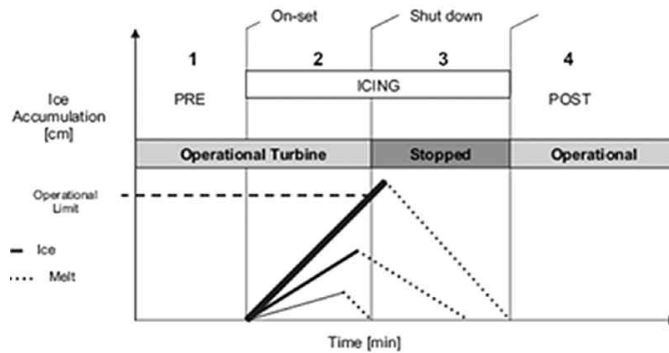
<그림 2-1> 풍력터빈의 얼음 부착<sup>(3)</sup>

풍력터빈은 얼음축적이 어느 한계에 이르면 정상 운전이 불가능해 가동을 중지하는 것이 필요하다. 얼음방재시스템을 적용하지 않은 풍력터빈에서의 얼음축적 단계 및 터빈 가동 상태는 <그림 2-2>과 같다. 제1단계는 착빙 전(pre-icing) 단계로서 터빈은 정상 가동되고, 제2단계(icing)에서는 얼음부착이 시작되지만 운전한계까지 풍력터빈은 운전을 지속한다. 제3단계는 얼음축적이 계속되어 시스템 고장을 막기 위해 터빈 가동 중지가 필요한 단계이다. 착빙 이후(post-icing) 단계인 제4단계에서는 얼음이 완전 제거될 때까지 정지 상태를 유지한다.



<그림 2-2> IPS이 없는 풍력터빈에서의 얼음축적 및 터빈가동 단계<sup>(2)</sup>

한편 IPS를 적용한 시스템에서는 <그림 2-3>에서와 같이 제2단계에서 운전한계에 도달되지 않도록 얼음성장을 제어하거나 얼음제거를 위한 정지시간을 단축시킨다. 제3단계에서는 풍력터빈이 운전한계에 도달하여 얼음제거 시까지 가동을 중지한다. 이때의 정지시간은 IPS이 적용되지 않은 시스템에 비해 단축되고 제4단계에서 정상적으로 가동한다.



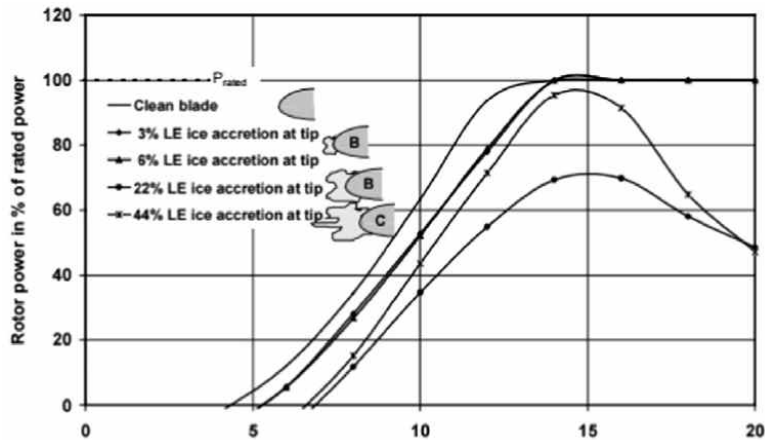
<그림 2-3> IPS 적용 풍력터빈에서의 얼음축적 및 터빈가동 단계<sup>(2)</sup>

## 2-2. 얼음부착에 따르는 문제

풍력터빈의 로터 블레이드의 착빙으로 인한 문제는 블레이드 부하(load) 증가로 인한 발전 손실, 안전 및 손상 문제, 측정오류 등으로 구분할 수 있다. 블레이드의 착빙은 자체 질량 증가와 함께 블레이드 표면의 마찰계수의 증가, 난류 발생에 따른 항력계수 증가 등으로 공기역학 특성이 변화함에 따라 발전출력이 떨어진다(그림 2-4).

또한 풍력터빈으로부터 비산하는 얼음 덩어리는 자체 시스템은 물론 상당한 거리에 있는 사람이나 물체에까지 심각한 피해를 줄 수 있으며 로터 블레이드의 과부하 및 진동 증가로 주요 부품들의 기계적 고장이 발생되어 터빈 정지까지 이를 수 있으며 시스템의 수명을 단축시킬 수 있다.

측정오류에서는 풍력터빈의 풍속계, 온도 센서와 같은 각종 계측장비의 측정오류를 발생시킴으로써 PIS, CMS(Conditioning Monitoring System, 상태감시시스템) 등 시스템 제어에 오류를 발생시킬 가능성이 매우 크다고 할 수 있다.



<그림 2-4> 다양한 착빙 상태에 따른 출력곡선<sup>(3)</sup>

### 3. 풍력터빈의 얼음방재기술

풍력터빈의 얼음부착을 방지하고 이미 축적된 얼음을 제거하기 위한 얼음방재시스템(IPS)은 에너지의 사용여부에 따라 능동시스템(active system)과 수동시스템(passive system)의 두 가지 방식으로 나눌 수 있다. 수동 시스템에는 에너지가 들어가지 않는 데 비해 능동시스템은 작동을 위한 에너지가 필요하다. 얼음방재시스템은 착빙방지 모드(anti-icing mode)나 얼음제거 모드(de-icing mode) 또는 양쪽 모드로 사용할 수 있다. 운전자들은 착빙방지 모드가 풍력터빈과 IPS의 동시 작동을 의미하는 것으로 흔히 잘못 이해하고 있다. 실제 일부 IPS는 작동하는 동안 터빈을 정지하는 것이 요구된다, 이것은 얼음 제거 시의 위험이 너무 높거나 풍력터빈의 피치 모터가 풍력터빈과 IPS가 동시 작동하게 되어 있지 않기 때문이다.<sup>(3)</sup>

#### 3-1. 수동형 IPS 기술

수동형 기술은 에너지 추가 없이 얼음 축적을 방지하는 데 적용된다. 이 기술은 제어시스템이나 특별한 낙뢰보호 장치가 없어 운전비용이 낮고 블레이드의 얼음부착을 방지한다. 이 기술의 대부분은 블레이드 표면의 물리·화학적 성질을 변화시키기 위해 착빙방지(anti-icing) 성질을 갖는 코팅(coating)을 이용한다. 터빈의 운전중지의 경우도 수동형 기술에 포함되며 이 기술은 EDF-EN<sup>(4)</sup>에 의해 실험 중에 있다.

##### 3-1-1. 얼음 부착력(ice adhesion strength)의 감소

물체 표면에 쌓인 얼음의 부착력을 줄이는 데에는 몇 가지의 방법이 있다. 가장 흔한 방법은 표면에 얼음-기피 코팅(icephobic coating)이다. 이 코팅은 낮은 표면에너지를 갖고 있으며 자주 이용된다. 이러한 성질의 재료에는 PTFE, PDMS, Wearlon 등이 있다.

이러한 코팅 대신 소수성 코팅(hydrophobic coating)도 블레이드 표면에 물이 축적되는 것을 방지하기 위해 사용할 수 있다. 하지만 소수성은 얼음 성장을 방지 기능은 충분하

지 않은 것이 입증되었다. 실험에 의하면  $-15^{\circ}\text{C}$  에서 연마된 알루미늄 위에 물방울은 5 초 이내에 동결하는 데 비해 산화세륨(ceria)이나 티타늄분말을 함유한 초소수성(superhydrophobic) 나노 복합체 위에서는 12~13분 지연되는 것으로 나타났다.<sup>(5)</sup>

다른 코팅 방법으로 친수성(hydrophilic)을 갖는 중심부를 소수성의 영역으로 둘러쌓는 코팅이 있다. 이 방법으로는 물을 제거하기 쉬운 곳으로 이동시킬 수 있다. 하지만 이 기술에 대한 연구 발표는 소수에 그치고 있다. 앞선 기술들의 대부분은 아직은 실험단계지만 일부 기술에서는 좋은 결과를 얻고 있다.

### 3-1-2. 열적 수동형 시스템(thermal passive system)

블레이드를 검은색으로 도색하면 흑색도료가 햇빛에서 블레이드를 가열시킴에 따라 백색도료의 경우보다 해빙시간을 단축시킬 수 있다.<sup>(6)</sup> 흑색도료 도포방식은 착빙 현상이 빈번하게 일어나지 않고  $0^{\circ}\text{C}$  이상이나 햇빛이 강한 지역에서 효과가 있다. 여름철에는 흑색도료가 블레이드를 과열시켜 기계적 성질을 약화시킬 우려가 있다.

### 3-1-3. 얼음축적 방지를 위한 가동 중지

EDF-EN은 현재 착빙 현상이 시작되면 바로 풍력터빈을 가동 중지시키는 기능 등의 다양한 방법들을 실험 중에 있다. 실제로 풍력터빈이 가동하고 있지 않을 때에는 블레이드에 쌓이는 얼음의 양은 줄어든다. 따라서 얼음 생성 후 재가동 시간이 빨라진다. 이 기술은 수동방식으로 투자가 소요되지 않지만 아직은 개선 여지가 많고 이득이 제로에 가깝다. 핵심 요소는 착빙 현상에 대한 예측 기능이 될 것이며 보다 좋은 탐지 수단이 개발되면 이 기술은 보다 나은 결과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

## 3-2. 능동형 IPS 기술

### 3-2-1. 화학적 방법

코팅은 자체의 동결점을 낮추기 위해 다른 화학물질과 결합할 수 있다. 이 물질들은 용해점과 동결점 사이에서 온도이격(thermal hysteresis) 현상을 일으킨다. 여기에 부동단백질(antifreeze proteins)과 같이 물방울을 걸러내는 생화학물질을 사용할 수 있다. 이 단백질들은 극지방의 동물들을 추위로부터 생존시킨다. 동결점 저하액체(depressant fluids)를 이용하여 과냉각된 물방울(supercooled droplet)의 동결을 막을 수 있다. 이 액체들은 공항에서 항공기의 얼음제거에 널리 사용된다. 이 액체 젤(liquid gel)은 시장에서 구입할 수 있고 얼음-기피 성질을 갖는 코팅과 비슷하다. 이 방법은 구조물 위의 얼음 생성을 완벽하게 막거나 구조물과 얼음 사이에 얇은 수막을 만들어 얼음을 중력이나 바람을 이용해 쉽게 제거한다.<sup>(7)</sup> 즉 비수용성 액상의 젤은 블레이드 표면의 얼음부착력을 줄이는 데 사용할 수 있고 얼음-기피성 점성 코팅으로 부른다.

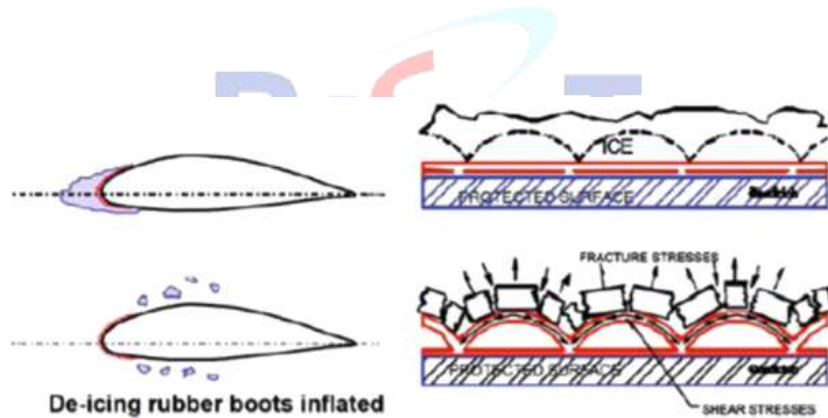
이들 방법은 예측에 따라 적기에 소규모 면적에만 적용할 수 있으며 자연분해가 되지 않아 특수한 경우에만 사용할 수 있다. 또한 이 방법은 액체를 수송할 펌프와 제어기(controller)가 필요하므로 능동기술로 볼 수 있다. 액체는 전력이 필요하지 않으므로 수

동 수단이다. 이 기술은 제어기에 따라 얼음제거나 착빙방지 모드로 사용될 수 있으며 비용이 낮지만 적용 시험하기 전에 시스템 설계 개선이 필요하다.

### 3-2-2. 기계적 방법

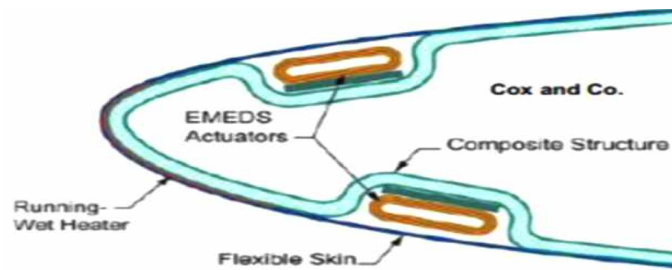
기계적 방법은 얼음 분리를 촉진시키기 위해 긁어내기 위한 스크레이퍼(scraper)의 사용 또는 진동이나 구조물의 움직임(movement)을 통해 방출된 에너지로 얼음을 물리적으로 부수는 수단을 포함한다. 이 방법은 기본적으로 얼음제거용이지만 제어가 적절하게 이뤄지면 착빙방지 목적으로도 사용할 수 있다. 수동얼음제거(scraper), 신축성 커버(flexible cover), 블레이드 요동(blade shaking), 고속공기 얼음제거기(high-velocity de-icer)는 풍력터빈과 같은 대형 구조물에는 적용할 수 없다.

(1)공압기술(Pneumatic techniques) : 공압 기술은 주로 소형 항공기 날개의 리딩에지의 얼음 제거에 이용된다. 얼음이 충분히 쌓이면 압축공기 펄스(pulse)가 연속적으로 공기 챔버(air chamber)에 대해 팽창과 수축을 반복한다.<sup>(8)</sup> 공압기술을 적용하면 <그림 3-1>에서와 같이 얼음 층이 뒤틀림에 따라 얼음이 부서지고 제거된다. 이 기술은 구성이 단순하고 에너지가 적게 들지만 블레이드의 공기역학적 성질이 변하므로 설치와 유지보수가 어렵다.



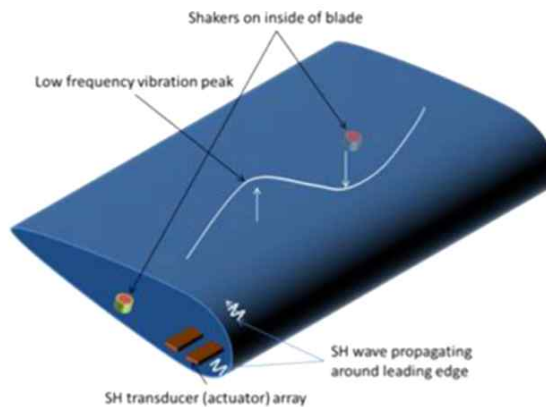
<그림 3-1> 팽창된 고무부츠(rubber boot)의 작동원리<sup>(9)</sup>

(2)배출기술(Expulsive techniques): 이 기술은 얼음을 부수고 제거하기 위해 전자(electromagnetic)나 압전(piezoelectric) 펄스를 이용한다. 전자-배출 얼음제거는 <그림 3-2>에서와 같이 금속 플레이트의 내면 근처에 설치한 스파이럴 코일(spiral coil)을 이용한다. 코일에 전기가 흐르면 전자력이 발생하여 금속이 변형됨으로써 표면 형상이 급변해 쌓인 얼음을 배출시킨다. 압전-배출 얼음제거의 경우는 압전소자에 전기가 흐르면 표면이 움직이고 이에 따라 얼음이 부서지고 제거된다. 이 시스템은 에너지 소비가 적고 자동화가 비교적 쉽다.



<그림 3-2> 배출방식의 얼음 제거<sup>(10)</sup>

(3)초음파 얼음제거(Ultrasonic de-icing) : 이 기술은 두 표면의 접착결합(adhesion bond)을 깨는 기술로서 용도가 넓다. 이 장치는 초음파로 두 재료의 접합부에 응력을 가한다. 전력소비가 적어 비용이 낮고 순간 얼음제거가 가능하다.<sup>(11)</sup> 이 기술은 헬리콥터 블레이드에 대해 효율성이 입증되었으며 풍력터빈 블레이드에도 유망하지만 층간박리(delamination) 위험을 고려해야 된다. 영국 회사 Delce-UT는 이 기술을 이용한 얼음제거 장치(그림 3-3)를 개발 중이고 2020년에 최초로 도입할 계획이다.<sup>(12)</sup>

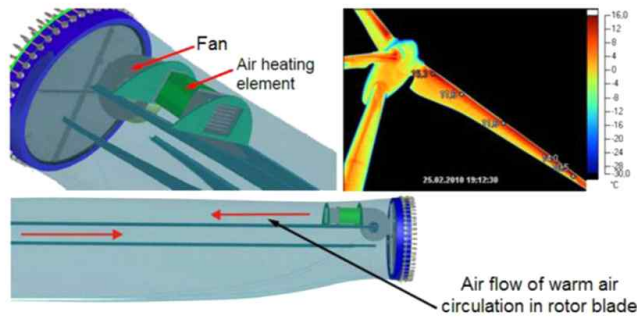


<그림 3-3> 초음파 얼음제거 기술<sup>(12)</sup>

### 3-2-3. 열적 방법

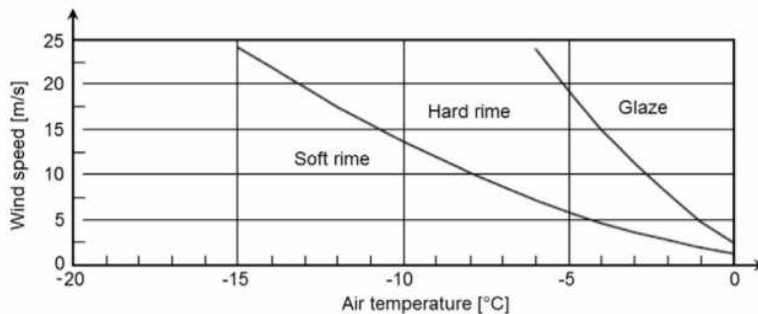
이 방법은 외부 에너지를 사용하여 표면온도를 동결점 이상으로 유지시켜 얼음 성장을 막는 입증된 기술이다. 전기가열소자, 금속이나 탄소섬유는 낙뢰에 대한 보호가 필요하다.

(1)고온공기 분사(hot air injection) : 항공기에서 흔히 이용하는 착빙방지 기술의 하나로 얼음부착 부위 근처 표면의 내부에 고온공기용 덕트(duct)를 설치하는 방법 등을 포함한다. 이 기술은 <그림 3-4>에서와 같이 블레이드의 리딩에지를 가열하는 데 고온의 공기 흐름을 이용한다.



<그림 3-4> ENERCON의 로터 블레이드 얼음제거 시스템<sup>(13)</sup>

이 기술은 2009년 Enercon이 풍력터빈에 적용했고 최근에는 Senvion과 Vestas가 이 기술을 사용했다. 이 시스템은 스위스 Saint-Brais의 현장 실험에서 좋은 결과를 얻었다. 하지만 이 시스템은 에너지가 많이 소요되고 효과는 기상 조건과 블레이드 사이즈에 크게 영향을 받는다. Enercon E-82와 E-70 터빈의 경우 가열시스템은 85kW의 전력을 소비한다. 공칭풍속에 있어 풍력터빈은 가열 모드에서 에너지의 약 96%를 계속 생산한다. 블레이드 가열에 의한 연간 발전 손실은 비 가열 시에 비해 대략 3.5%와 10%이었다. 터빈 정지로 인한 발전 손실은 3%이고 가열 에너지는 연간 발전량의 0.5%로 나타났다. 하지만 수치모델에 의하면 거리가 길어질수록 공기의 열 손실이 늘어나므로 이 장치의 효율은 착빙강도(icing severity)와 블레이드 길이에 따라 낮아진다. 블레이드는 구조 건전성면에서 최고 72°C 까지 견딜 수 있다. 블레이드 쉘 재료의 열전도도가 낮으므로(1W/mk 미만) 열 문제는 블레이드 벽을 통한 열 저항에 지배를 받는다. 따라서 착빙방지는 많은 에너지(1~10kW/m<sup>2</sup>)가 소요되고 안전을 위해 착빙 조건이 약하거나 중간(-3°C 이상) 이어야 한다. 이러한 조건은 얼음생성이 어려운 너무 낮은(-25°C) 때에도 나타난다. 실제로 <그림 3-5>와 같이 임계온도 범위는 0와 -15°C 사이이다. 이러한 제한으로 부드러운 서리(soft rime)만을 제거할 수 있다. 이 장치는 높은 고도에 설치된 풍력터빈에는 특수 설계가 필요하다. 예로서 해발 2400M에서는 공기밀도가 20% 낮아져 시스템 효율이 20% 떨어지므로 공기 대신 다른 에너지 운반물질을 검토해야 한다. 또한 고온공기 시스템은 전력소비와 긴 대기시간(latency time)으로 기존 풍력터빈에는 적용할 수 없다. 이런 이유로 연구는 주로 저항히터 쪽으로 옮겨가고 있다.



<그림 3-5> 풍속과 공기온도에 따른 축적된 얼음 종류<sup>(14)</sup>

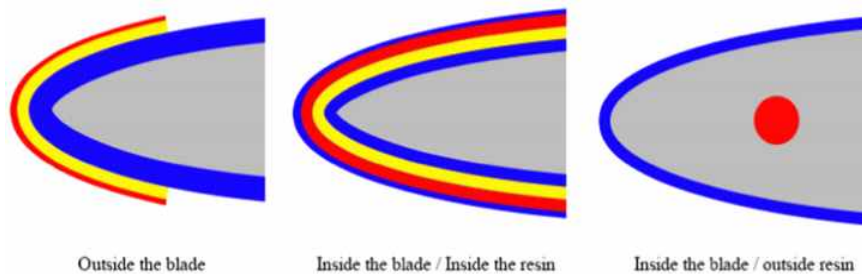


(2)저항히터(resistive heater) : 이 히터방식은 세 가지의 구성방식이 있다 (그림 3-6).

①블레이드 외측 구성: 이 구성 방식은 블레이드의 바깥 면에 히터를 접착시키는 방식으로 본질적으로 접착제의 열저항과 기계적 특성에 영향을 받는다. 이 특성은 온도에 영향을 받아 히터를 분리시켜 발전 손실을 떨어뜨린다. 또한 낙뢰에 영향을 받으며 2차 착빙을 일으킬 수 있다. 이 기술을 적용한 몇 제조사의 제품은 시장에서 구입할 수 있다.

②블레이드 내부 방식 : 여기에는 수지 내부 방식과 수지 외부 방식으로 구분된다. 수지 내부 방식은 기존 풍력터빈에 적용할 수 없으며 수지 자체에 대한 열과 낙뢰에 대한 영향이 불확실하다. Siemens와 Nordex는 자사 풍력터빈의 저온지역용에 설치했다. 복합재의 진전으로 이 기술은 관심 있는 연구 과제로 보인다.

수지 외부 방식은 위의 방식과 비슷하지만 고온공기 시스템보다 효과적인 방법으로 볼 수 있다. 고온공기 방식의 문제인 에너지 소비와 긴 대기시간을 저항히터를 덕트 내에 배치하는 방법으로 해결한다. 향후 흥미로운 연구 과제가 될 수 있다.



<그림 3-6> 저항히터의 구성(적색: 히터, 노랑: 절연체, 파랑: 에폭시수지, 회색: 블레이드 내부)<sup>(3)</sup>

(3)마이크로웨이브 가열(microwave heating) : 1982년 Hansman은 물방울에 마이크로웨이브 전자파 에너지를 투과시켜 과냉각된 물방울을 가열하는 마이크로웨이브 얼음방재 시스템을 제안했다. 마이크로웨이브 주파수는 물 흡수 특성에 맞추어 선정된다. 이 시스템은 균일한 열 분포와 적은 전력소비와 함께 낙뢰에 견디고 유지보수가 쉽지만 안전측면에서의 주위가 필요하다. LM Wind Power(이전 LM Glasfiber)는 이 장치를 풍력터빈에 적용한 사례를 갖고 있다.

(4)적외선 가열(infrared heating) : 적외선 가열은 전력공급원에서 거리가 떨어진 목표물에 에너지를 전달하는 데 이용된다. 주요 이점은 공기를 통해 에너지를 전달하므로 장치를 블레이드에 설치할 필요가 없는 점이다. 따라서 장치 부착에 따른 블레이드의 조도(roughness) 증가가 없고 얼음제거와 착빙방지에 적용할 수 있다. 얼음은 적외선 복사열의 강한 흡수물질이므로 적외선으로 쉽게 용해시킬 수 있다. 이 기술은 블레이드 내외 구조물에 있어서 화재 방지를 위해 해당 주파수의 복사열을 흡수하지 않는 재료 선택이 매우 중요하다. 예로서 주어진 파장에서 연마된 알루미늄은 복사열의 10%를 흡수하는 데 비해 기름은 90%를 흡수한다. 나셀(nacelle) 내부의 윤활제와 기름이 묻은

부품들이 급속하게 과열될 수 있어 특별한 안전장치가 필요하다.

#### 3-2-4. 능동 피치 제어(active pitch control)

짧은 착빙 현상 이후에도 풍력터빈의 실속제어(stall-control)는 큰 폭의 발전 손실을 발생시킨다. 이것은 얼음이 공기역학적 형상을 변화시키기 때문이다. 이 영향은 풍력터빈의 피치 제어를 통해 줄일 수 있다. 이 기술은 실제적인 얼음방재 기술은 아니지만 착빙 현상으로 인한 발전 손실을 상쇄시킨다. 피치 제어로 발전량을 극대화시킬 수 있지만 기상 조건에 따른 로터의 익형(airfoil profile)에 대한 충분한 지식이 필요하다. 이 방법은 부하 증가와 제어의 복잡성은 있지만 착빙 현상의 강도와 구조물이 받는 장기 영향 측면에서는 가장 효율적인 얼음방재 방법의 하나가 될 수 있다.

### 3-3. IPS의 최적화 기술

#### 3-3-1. 기술의 결합

서로 다른 기술들의 결합을 통해 시너지 효과를 얻을 수 있다. Maissan<sup>(15)</sup>은 얼음-기피 코팅과 흑색도료를 결합했다. 얼음-기피 코팅은 풍력터빈 블레이드의 착빙 방지에 효율성이 없는 것으로 알려져 있고 흑색도료는 낮 시간에 블레이드를 가열한다. 하지만 흑색도료는 착빙이 자주 일어나지 않고 온도가 0°C 이상이거나 일사강도가 높은 사이트에서는 효과를 낼 수 있다. 최근에는 소수성 코팅과 전기저항의 히터시스템이 결합되었다. 착빙방지 모드에서 소수성 코팅은 에너지 소비를 7%까지 줄이는 데 비해 초소수성 코팅은 절반까지 줄일 수 있었다. 저항히터와 초소수성 코팅 결합 시 얼음제거 모드에서는 에너지 소비가 15% 감소되었다. Antonini는 얼음제거방법을 적용한 초소수성 코팅 방법으로 소비전력을 크게 줄였다.<sup>(16)</sup> 이것은 소수성 표면 위의 얼음 구조는 밀도가 낮아 파쇄와 용해가 용이하기 때문이다.

#### 3-3-2. 착빙방지 및 얼음제거의 제어

이 분야에 대한 연구는 많이 이뤄지지 않았다. 착빙방지 및 얼음제거시스템의 제어에는 최적화가 필요하며 CFD의 첨단기술과 제어방법에 관련된 새로운 시뮬레이션 툴이 사용된다. Kelly Aerospace의 풍력터빈 IPS는 착빙 현상 동안 연속적으로 터빈을 가동하기 위해 펄스전력(pulsing power)을 이용한 외부 전열 얼음제거기(external electric thermal de-icer)이다. 이것은 상대습도, 블레이드 온도, 주위온도를 측정하여 얼음제거시점을 결정한다. 펄스전열 얼음제거(pulse electro thermal de-icing) 기술은 항공기, 교량, 자동차 바람막이(windshield)에 널리 사용되고 있다. Siemens는 블레이드에 얼음이 탐지되면 로터를 정지하고 역풍(black-wind)으로 배치하고 얼음제거기를 작동한다. 얼음제거기가 정지하면 로터는 다시 바람을 향한다. 이 방법은 실험에는 성공했지만 개선이 필요하다.

다른 제어방법으로 얼음제거시스템 특히 외부 열 얼음제거기(external thermal de-icer)의 구성 배치를 들 수 있다. 전체 블레이드의 얼음 제거는 많은 전력을 소비하고 어떤 조건에서는 착빙을 증가시킬 수 있다. 대부분의 제조사들은 착빙에 가장 영향을 크게

받는 것으로 밝혀진 블레이드의 리딩에지에 따라 열 얼음제거기를 설치한다. 하지만 물의 역류가 2차 착빙을 일으킬 수 있기 때문에 최적 위치 선정을 위한 수치 시뮬레이션이 필요하다. Vestas의 고온공기 얼음제거시스템은 전력곡선 얼음검지(power curve ice detection)에 기초하며 블레이드 전체 현(chord)의 바깥쪽 1/3과 리딩에지의 날개 끝 방향으로 바깥쪽 2/3 부위만을 가열한다. 이 기술은 얼음제거 효율을 떨어뜨리지 않고 역류 착빙 위험을 줄여주며 블레이드로부터의 얼음 비산을 최소화하고 전력곡선 회복도 개선한다. 얼음방제기술에 따라 시스템 제어는 매우 어렵고 불가능한 경우도 있다.

### 3-4. 얼음탐지(Ice detection) 기술

풍력터빈은 구조물 위에 얼음이 출현한 시점을 예측하기 위해 정확한 얼음탐지 시스템을 갖추는 것이 필요하다. 측정은 주로 나셀 위나 풍력단지 내의 장소에서 이뤄진다. 얼음탐지 방법에는 온도 및 풍속과 함께 부유물 중의 물방울 크기와 공기 중 수분함량과 같은 얼음 출현 가능성을 나타내는 파라미터를 탐지하는 방법이 있으며 착빙을 알려주는 핵심 파라미터는 상대습도와 공기온도가 된다. 일반적으로 얼음 탐지 기술은 직접적인 측정 방식과 간접 측정 방식으로 분류할 수 있다.<sup>(2)</sup>

#### 3-4-1. 직접 측정 기술

직접 측정 기술은 얼음 측정이 풍력터빈의 표면에서 이뤄지는 것으로 주요 방법은 다음과 같다.

(1)초음파 감쇠(ultrasonic damping): 초음파 신호를 측정하여 해석하는 이 기술은 센서가 와이어 가이드(음파 감쇠가 적음)를 통해 신호를 송신하고 수신한 신호 내에서의 변화 유무를 측정하여 얼음 출현 여부를 판단한다.

(2)공명(resonance) 내의 주파수 측정: 이 방법은 진동 탐침(oscillating probe)을 이용하는 기술로서 얼음 출현 시 탐침의 주파수가 감소하는 현상을 이용한다. 탐침의 주파수는 얼음이 성장함에 따라 줄어든다. 주로 얼음제거가 끝난 후 터빈을 자동적으로 재가동시키기 위한 블레이드 제어시스템에 이 기술이 사용된다.

(3)다이어프램(diaphragm)의 진동 측정: 이 방법은 풍력터빈에 얼음 출현 시 정전용량이 변화하는 현상을 이용하여 코일과 실리콘을 침적한 다이어프램 간의 용량을 측정하는 기술을 이용한다. 이 기술을 적용한 장치로 Labkotec의 LID-3300IP의 사례가 있다.<sup>(17)</sup>

(4)전기적 성질의 변화: 두 전극 간의 정전용량의 변화를 이용한다. 이 변화는 얼음의 얇은 층의 출현으로 인한 비투자율(relative permeability)의 변동에 의해 일어난다.

(5)온도변화의 측정: 이 방법은 복수의 온도센서를 이용한다. 이 중 하나는 격리시키고 나머지는 공기흐름에 접촉시킨다. 센서들의 측정 온도를 비교하여 얼음 축적 여부를 판정한다. 몇 사례에서는 센서들을 정해진 온도로 안정될 때까지 가열한다. 얼음이 존재하면 정해진 온도로 안정될 때까지 가열시간이 길어진다.

(6)광학 측정

①반사광의 직접 측정: 광원에서 반사되거나 방출된 빛을 측정한다. 얼음이 존재하면 반

사광에 변화가 생긴다. 이 기술의 적용 예로서 HoloOptics 시리즈의 T40 센서가 있다.<sup>(18)</sup>

②적외선 분광법(Infrared spectroscopy): 적외선의 흡수와 반사를 측정하여 얼음 생성 여부를 판단한다. Remote Surface state DSC111 센서에 이 기술이 적용된다.<sup>(19)</sup>

③표면 내부로부터의 반사: 굴절률(refractive index)이 높은 매체로부터 낮은 매체로 빛이 통과할 때 발생하는 전반사(total internal reflection)를 이용한다. 얼음이 없으면 전반사가 일어나고 얼음이나 물이 있으면 빛이 횡단한다.

(7)얼음하중(ice loads)의 측정: ISO 12494에는 얼음 성장에 대한 측정법이 있다. 일정한 속도로 회전하는 로드(rod)에 공기가 부딪치면 전면에 소량의 얼음이 성장한다. 이 탐침이 얼음 중량을 측정한다. Ice Load Surveillance 센서에는 이 기술이 적용되어 있다 (Combitech.se, 2014).<sup>(20)</sup>

### 3-4-2. 간접 측정 기술

간접 방식의 얼음탐지 기술은 수집한 데이터와 이전 기록과의 비교를 통한 얼음 발생 여부를 판별하는 방법으로서 주요 접근법은 다음과 같다.

(1)예상 발전출력과 실 출력과의 비교: 이 방법은 실 발전출력과 예상되는 이론발전출력 간의 비교에 기초를 둔다. 기상 상태가 착빙하기에 적합하여 실 발전곡선이 이론발전곡선보다 낮아지는 경우 얼음 생성이 예상된다.

(2)가열 풍속계(heated anemometer): 가열한 풍속계와 가열하지 않은 풍속계의 신호(회전속도)를 비교하여 얼음을 탐지하는 방법이다. 이 기술을 적용한 예로 풍속계와 풍향계로 구성된 NRG의 Ice Free3 센서가 있다.<sup>(21)</sup>

(3)노점(dew point)과 온도: 이 방법에서는 노점과 공기의 온도가 비슷할 때 얼음이 부착된 것으로 판단한다.

(4)소음 측정: 얼음이 부착한 상태에서 회전하는 블레이드의 소음 수준과 얼음이 부착안 된 상태에서의 블레이드의 소음 수준을 비교하여 판단하는 방법이다.

(5)풍력터빈 블레이드의 공명 주파수(resonant frequency)의 변화: 이 기술은 로터 블레이드의 진동 데이터를 동일 조건의 기존 데이터와 비교 분석하여 얼음 생성 여부를 판단한다.<sup>(22)</sup>

(6)성에 확률지도(Probability frost map): 웹, 회사 등에서 제공되는 예측 데이터 정보를 분석하여 얼음 생성 여부를 판단한다.

### 3-4-3. 착빙 예측

풍력터빈에서의 얼음 부착의 예측은 착빙으로 인한 피해를 줄이기 위해 중요하다. 현실적으로 풍력단지에서는 지역 기상 데이터와 얼음탐지 측정기에만 의존한다. 하지만 대부분의 지역 기상 데이터는 충분히 정밀하지 못하고 지형, 토양의 거칠기, 풍황계측 기상탑(met mast)과의 거리와 터빈 높이에 따라 수정할 필요가 있다. 시간 단축 등을 위해 경험식을 흔히 적용하지만 가장 앞선 방식인 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 활용하는 것이 바람직하다. 풍력터빈의 착빙 방지의 운용효율 향상에는 예측 기술의 개

발과 활용이 필요하다.

## 4. IPS의 비교

### 4-1. IPS 제조사 현황

IPS 제조사 현황은 <표 4-1>에서와 같으며 제조회사는 터빈제조사, IPS 전문회사, 비 전문회사로 구분할 수 있으며 제품의 성숙단계로는 실용(시장도입), 시작품, 실험단계로 분류한다.<sup>(3)</sup>

<표 4-1> IPS 별 시장(제조사) 현황<sup>(3)</sup>

기술			제조회사			
명칭	모드	타입	구분	이름	국가	단계
외부 저항히터	능동	얼음제거	터빈	Leiwind	이탈리아	실용
				LM-Wind Power <sup>a</sup>	독일	실용
					덴마크	시작품
			IPS	Green Wind Global	캐나다	시작품
				KAT	핀란드	철수
				비전문	Kelly aerospace	미국
Antolin	스페인	시작품				
내부 저항히터	능동	터빈	Siemens		스웨덴	실용
			Nordex	독일	실용	
고온공기분사	능동	착빙방지/얼음제거	터빈	Enercon	독일	실용
				Vestas	덴마크	실용
				Senvion <sup>b</sup>	덴마크	시작품
				LM-Wind Power <sup>a</sup>	덴마크	실험
공압 배출	능동	얼음제거	비전문	UTC Aerospace System <sup>c</sup>	미국	실험
전기적 배출	능동	얼음제거	비전문	UTC Aerospace System <sup>c</sup>	미국	실험
초음파	능동	얼음제거	IPS	DeICE-UT	UK	시작품
열 코팅	수동	착빙방지	IPS	Polytech Services Company	미국	실용
운전중지	수동	착빙방지	운전/개발	EDF-EN	불/캐나다	시작품

비고: <sup>a</sup> 전 LM-Glasfiber, <sup>b</sup> REpower에 합병, <sup>c</sup> Goodrich에 합병

### 4-2. IPS 기술 비교

얼음방재 기술은 다음의 9가지 기준으로 비교할 수 있다. 즉 ①에너지 소비, ②얼음방재 방식 ③ 비용(운전, 보수유지비 포함), ④거칠기 증가(블레이드 표면), ⑤유효성, ⑥개발 단계, ⑦제어측면, ⑧낙뢰방지장치의 필요 유무, ⑨기존 풍력터빈에의 적용성이다. 각 IPS 기술을 이 기준들에 따라 비교한 결과는 <표 4-2>과 같다.

또한 앞의 비교 기준과 문헌에 보고된 성능 자료를 바탕으로 적합하기에 유망한 기술은 착빙강도와 풍력터빈 용량에 따라 <표 4-3>에서와 같이 요약할 수 있다. 풍력단지에 적용할 IPS 선정할 때에는 앞서 설명한 기술 비교 이외에도 투자회수 예측을 위한 비용 특히 운전비용에 대한 분석

아 필요하다.

<표 4-2> IPS 기술 비교<sup>(3)</sup>

기술	구분	기존 적용	낙뢰 대책 필요	제어수준	단계	유효성	거칠기 증가	비용	전력소비
소수성 코팅	착빙방지	O	X	-	시작품	제한	M	↓	-
얼음기피 코팅	착빙방지	O	X	-	시작품	제한	M	↓	-
점성 코팅	착빙방지	O	X	-	시작품	열화	M	↓	-
생화학재료	착빙방지	O	X	-	실험	열화	M	↓	M
흑색도료	착빙방지	O	X	-	시작품	↓↓	↑↑	↓↓	-
공압	얼음제거	X	X	M	실용	↑↑	↑↑	↑	↓↓
배출	얼음제거	X	X	M	실용	↑	↑	↑	↓↓
고온공기	양쪽	X	X	↑	실용	↑	-	↑↑	M↑
외부 전열히터	양쪽		O	M	실용	↑	M	↑↑	↓M
내부히터(수지 내측)	양쪽	X	O	M	실험	↑↑	-	↑	↓M
내부히터(수지 외측)	양쪽	X	O	M	실험	↑	-	M	↓M
마이크로웨이브	얼음제거	O	O	↑↑	실험	-	-	M	↓
적외선	얼음제거	O	O	↑↑	실험	-	-	M	-
초음파	얼음제거	O	X	낮음	실험	↑↑	↓↓	M	↓
능동피치제어	-	O	X	↑	실험	↑	-	-	↓
운전정지	착빙방지	O	X	↑	시작품	제한		-	-

비교, 매우 높음: ↑↑, 높음: ↑, 중간: M, 낮음: ↓, 매우 낮음: ↓↓, N/A: -

<표 4-3> 유망 IPS 기술<sup>(3)</sup>

구분	풍력터빈	착빙 확률(%/년)				
		0-0.5	0.5-3	3-5	5-10	10 초과
신규 단지	1MW 미만	흑색도포, 능동피치제어	능동피치제어	능동피치제어 내부/외부 저항히터	내부/외부 저항히터	내부/외부 저항히터
	1MW 초과	능동피치제어	능동피치제어	내부/외부 저항히터, 고온공기분사	내부/외부 저항히터 ± 얼음기피 코팅, 고온공기분사	내부/외부 저항히터
기존 단지	1MW 미만	흑색도포, 능동피치제어	능동피치제어	능동피치제어 외부 저항히터	외부 저항히터	외부 저항히터
	1MW 초과	능동피치제어	능동피치제어	외부 저항히터	외부 저항히터 ± 얼음기피 코팅	외부 저항히터+ 얼음기피코팅

비고: '±' 는 with/without를 의미

### 4-3. IPS의 비용 분석

IPS의 비용은 투자비용과 운전비용으로 나눌 수 있으며 투자에 앞서 양쪽 비용을 고려할 필요가 있다. 투자비용에는 구입가격, 설치비용, 설치기간 중 풍력터빈 가동 중지 때 따른 경제적 손실이 포함된다. 우선 투자비용에서는 600kW 풍력터빈의 외부표면에 설치한 저항히터는 풍력터빈 전체 비용의 5%를 차지하는 것으로 보고되어 있고 대형 터빈에서의 점유 비율은 수치는 다소 보다 낮아진다. 이 장치의 비용은 터빈 1기당 200,000CS\$ 소요된다. 설치하는 매우 복잡하고 소요 기간은 약 1주일이며 가혹한 외부 환경에서 물류 비용(크레인 등)은 높다. 한편 고온공기 분사장치의 비용은 50,000CS\$/터빈(설치비용 없음)으로 크게 낮다. 다른 신규 기술들에서는 예로서 현재 DeICE-UT가 설계하여 곧 실용화 예정인 초음파 얼음제거장치는 40,000€/터빈 수준일 것이고 운전비용도 매우 낮게 될 것이다.

IPS는 많은 전력을 소비하므로 운전비용이 낮은 기술이 가장 효율적인 기술이 된다. 운전비용은 에너지소비와 유지보수비용이 포함되고 문헌에 의하면 저항히터 방식의 운전비용은 AEP(Annual Energy Production, 연간에너지생산)의 약 6~12%이고 에너지소비는 1~4%(약 15kW/날개) 정도를 차지한다. 고온분사 방식의 경우에는 AEP의 8~14%이고 에너지소비는 3%(약 25kW/날개) 정도를 점유한다. 분명히 에너지 소비는 단지 사이트에서의 착빙강도에 따라 평가되어야 한다. 하지만 착빙방지시스템(고온공기분사)이 얼음제거시스템(저항히터)에 비해 더 장시간 작동하므로 더 많이 에너지를 소비하는 것을 고려해야 한다.

### 4-4. IPS의 비교 종합

풍력산업의 IPS에 있어서 신뢰성이 검증된 시스템은 아직은 시장에서 공급되고 있지 않으므로 신뢰도와 안전성의 보다 개선이 필요하다. 보수관리가 쉽고 낙뢰보호 장치도

필요 없는 코팅방법은 실제 적용이 가능하지만 착빙강도가 약한 경우에만 효율성이 있어 다른 가열시스템과의 결합이 필요하다.

화학물질 사용에서도 시장에서 공급 가능하지만 내구시간이 짧아 유지보수가 어렵고 현재 대부분은 생분해(biodegradable)가 되지 않으므로 개선이 필요하다.

외부 저항히터 방식은 주로 블레이드의 리딩에지에 부착된다. 이 배열은 착빙방지에는 효과적이지만 얼음제거에는 효과가 낮으며 효율성과 전력소비 양쪽을 고려하여 소비전력이 적은 얼음제거 목적으로 적용하는 것도 검토할 필요가 있다. 또한 이 기술은 능동피치제어, 흑색도료 도포 등 다른 수단과 결합하는 것이 필요하다. 이 방식은 내구성에 있어 기대 기간보다 일찍 히터가 이탈되는 문제도 개선하는 것이 필요하다.

제어측면에 있어 히팅 방식 적용 시 적절한 제어는 얼음축적물의 공기역학적 특성에 영향을 주므로 매우 중요하다. 어느 시점에서의 얼음제거는 위험한 얼음 이탈이나 구조물 파손 우려가 있는 동적 반응을 불러일으킬 수 있다. 만약 블레이드 하나에서 착빙방재 기능이 작동하지 않으면 로터 블레이드 전체에 심한 불균형을 일어나 부품이 손상될 수 있다. 따라서 착빙이 심한 지역은 제어 알고리즘에 안전수단이 추가되어야 한다.

## 5. 맺음말

이상과 같이 추운기후 지역이나 높은 지대에 설치된 풍력터빈에 있어 발전 손실, 시스템 고장 및 가동 정지와 함께 비산되는 얼음 덩어리에 의한 안전사고를 일으키는 착빙 현상에 대한 개요와 대응기술에 대해 설명했다. 착빙 가능성이 높은 풍력단지에는 착빙방지(anti-icing) 장치와 얼음제거(de-icing) 장치가 포함된 얼음방재시스템(IPS)이 필수지만 이들 시스템들은 대부분 많은 전력을 소비하고 터빈 정지도 자주 이뤄지므로 상당한 경제적 손실을 발생한다.

이러한 착빙에 의한 손실을 최소화하는 데에는 IPS의 성능향상이 물론 중요하지만 이에 앞서 얼음생성 시점을 조기에 정확히 예측하거나 탐지하는 얼음탐지 시스템의 개발 적용이 필수적이다. 이를 위해 얼음탐지장치의 주요 요소인 고성능 센서 개발과 함께 얼음생성 확률을 정확히 나타내는 파라미터(온도, 상대습도, 물방울 크기 등)의 개발, 기상예보와 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 연계 활용 등의 확대가 필요하다.

한편 유럽연합은 풍력터빈의 착빙현상 분석과 전력손실 등 피해 영향에 대한 연구 확대를 위해 WECO(Wnd Energy in Cold Climate) 프로젝트<sup>(23)</sup> 와 같은 프로젝트를 지원하고 있다. 동절기 혹한기를 갖는 우리나라도 풍력터빈의 착빙 문제 완화는 풍력시장 확대를 위해 필수적으로 볼 수 있다. 현재 활발하게 추진되는 풍력단지의 확충과 함께 산학연의 착빙 관련기술의 연구 개발 확대와 이에 대한 정부의 관심과 지원이 요구된다.

### <참고문헌>

1. ICING BLADES Project, "Research of Advanced Techniques to Remove and



- Prevent the Ice on the Blades of the Wind Turbines”, Spanish Government, Innacto Research Program. 2014, Ref: IPT-2012-0563-120000.
2. Jesús María Pinar Perez, Fausto Pedro García Marquez, Diego Ruiz Hernandez, “Economic viability analysis for icing blades detection in wind turbines”, Journal of Cleaner Production, 135, 2016, pp.1150~1160.
  3. Oloufemi Fakorede, Zoé Feger, Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca, Jean Perron, Christian Masson, “Ice protection systems for wind turbines in cold climate-characteristics, comparisons and analysis”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65, 2016, pp.662~675.
  4. <https://www.edf-energies-nouvelles.com/en/operations-maintenance/services/>
  5. Karmouch R, Coudé S, Abel G, Ross G. “Icephobic PTFE coatings for Wind Turbines operating in cold climate conditions”, IEEE electrical power & energy conference, Montréal, Canada, October 2009.
  6. Seifert, H., “Technical requirements for rotor blades operating in cold climate” BOREAS VI 9, 2003.
  7. Laflamme J, et al. “De-icing techniques before during and following ice storms”, volume I, main report. CEA Technologies, 2002.
  8. Mayer C, et al. “Wind Tunnel Study of Electro-Thermal De-Icing of Wind Turbine blades”. Int J Offshore Polar Eng, 17(3), 2007, pp.182~188.
  9. Botura G, Fisher K., “Development of Ice Protection System for Wind Turbine Applications”, BOREAS VI, Pyhänturi, Finland, FMI, 2003.
  10. Ryerson, C. “Assessment of superstructure ice protection as applied to offshore oil operations safety: ice protection technologies, safety enhancements, and development needs“, DTIC Document, 2009.
  11. Goraj Z. “An overview of the deicing and anti-icing technologies with prospects for the future”. Proceedings of 24th international congress of the aeronautical sciences(ICAS), Yokohama, 2004.
  12. DeIce-UT. “Summary description of project context and objectives”. <http://www.deice-ut.eu/publications/> > ; 2014 (Retrieved 09-16.09.14).
  13. Enercon. Windblatt, Enercon Magazine for wind energy, 2011.
  14. Baring-Gould I, et al. “IEA wind recommended practice 13: wind energy in cold climates”. IEA Task-19, 22 May 2012.
  15. Maissan JF. “Wind power development in sub-arctic conditions with severe rime icing”. North Rev, 24, 2002.
  16. Antonini C, et al. “Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems”. Cold Reg Sci Technol, 67(1), 2011, pp.58~67.

17. Labkotec Indutrade Group, 2014. LID-3300IP Ice Detector. Co. Insight, Operation and Maintenance. World Wind Technology. [www.windpower-international.com](http://www.windpower-international.com).
18. HoloOptics, T-40 Series Icing Rate Sensors, 2013. <http://holooptics.net/>.
19. Vaisala, 2009. Sensor remoto Vaisala DSC111 para deteccion del estado de la uperficie de la carretera Informacion tecnica. Technical Specifications. Ref. B210470ES-B.
20. Combitech website: <http://www.combitech.se>
21. NRG and R. Road, 2012. NRG IceFree3™ Wind Resource Assessment Vane and Anemometer. User Manual.
22. Carlsson, V., “Measuring Routines of Ice Accretion for Wind Turbine Applications. The Correlation between Production Losses and Detection of Ice”. 2010. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:370953/FULLTEXT01.pdf>Viktor
23. Tammelin, B., Cavaliere, M., Holttinen, H., Morgan, C., Seifert, H., “Wind energy production in cold climate”, WECO, Finn, Meteorol Inst. 1998, pp.1~38.



이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.