

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(2), 134-143(2014)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.2.134>

## 풍력 블레이드의 결빙에 의한 공력특성 및 성능 변화

박지호, 명노신\*

## Atmospheric Icing Effects on the Aerodynamic Characteristics and Performance of Wind Turbine Blade

Ji-Ho Park and Rho-Shin Myong\*

Department of Aerospace and System Engineering and Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University

## ABSTRACT

A significant degradation in the aerodynamic performance of wind turbine system can occur by ice accretion on the surface of blades operated in cold climate. The ice accretion can result in performance loss, overloading due to delayed stall, excessive vibration associated with mass imbalance, ice shedding, instrumental measurement errors, and, in worst case, wind turbine system shutdown. In this study, the effects of ice accretions on the aerodynamic characteristics of wind turbine blade sections are investigated on the basis of modern CFD method. In addition, the computational results are used to predict the performance of three-dimensional wind turbine blade system through the blade element momentum method. It is shown that the thickness of ice accretion increases from the root to the tip and the effects of icing conditions such as relative wind velocity play significant role in the shape of ice accretion.

## 초 록

추운 기후에서 운영되는 풍력터빈 시스템의 표면에 발생한 결빙으로 인하여 공기역학적 성능이 크게 저하될 수 있다. 이러한 결빙은 양력감소 및 항력증가를 야기하고, 발전효율에 부정적인 영향을 미치게 된다. 이로 인하여 풍력발전기의 성능저하 또는 과부하, 무게중심의 변화에 따른 과도진동, 결빙파편이 지상으로 떨어질 경우의 안전성 문제, 계기의 결빙으로 인한 계기 측정오차, 최악의 경우 풍력 시스템 정지 등의 문제가 발생한다. 본 연구에서는 결빙증식이 풍력 발전기의 공력특성에 미치는 영향을 CFD 기법을 이용해 분석하였다. 또한 결빙증식 결과를 바탕으로 BEM 기법을 적용시켜 삼차원 블레이드에 대한 공력성능을 계산하였다. 결빙의 두께는 상대적인 속도차이에 의해 블레이드 중심에서 끝단으로 갈수록 증가함을 알 수 있었고, 공기의 속도가 결빙증식에 미치는 주요 인자임을 확인하였다.

**Key Words** : CFD(전산유체역학), Wind Turbine Blade(풍력터빈 블레이드), Ice Accretion(결빙증식), Blade Element Momentum Method(날개요소 운동량 기법)

† Received: November 7, 2013 Accepted: January 22, 2014

\* Corresponding author, E-mail : myong@gnu.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

## I. 서 론

풍력 에너지는 최근 세계시장에서 빠르게 성장 중인 주요 미래 청정에너지원 중에 하나이다. 이에 따라 풍력 시장의 성장과 함께 대단위 풍력 발전 단지가 유럽, 북미, 아시아 전역에 설치되고 있다. 특히 추운지역에서 운용되는 풍력 터빈 시스템과 관련된 대기결빙에 대한 연구는 최근 중요한 연구주제로 떠오르고 있다[1]. 이는 극한 기후에서 작동하는 풍력 터빈 시스템이 결빙에 의한 가동 중단과 성능 손실 없이 운영될 필요가 있기 때문이다. 유럽, 북미, 아시아 등의 고산지대와 해상 입지조건인 경우 연 평균 대기결빙에 영향을 받는 일수는 10~80일 정도이다. 혹한 기후에서 발생하는 높은 풍속(풍력 에너지는 풍속의 제곱에 비례)과 낮은 온도로 인한 높은 밀도는 일차적으로 풍력발전기의 발전 성능을 향상시킨다. 반면에 대기온도가 낮고 상대습도가 높은 영역에서 공기 중의 액적이 블레이드의 표면과 충돌함으로써 블레이드 표면에 결빙이 발생하게 된다. 이로 인하여 풍력발전기의 성능저하 또는 과부하, 무게 중심의 변화에 따른 과도진동, 결빙과편이 지상으로 떨어질 경우의 안전성 문제, 계기의 결빙으로 인한 계기 측정오차, 최악의 경우 풍력 시스템 정지 등의 문제가 발생한다. 스웨덴과 노르웨이 등의 풍력 발전 단지의 데이터를 예로 들면, 결빙으로 인한 풍력 발전의 연 평균 성능손실은 0.5-30%로 추정된다. 이는 풍력 터빈의 대기 결빙에 의한 효과가 소음, 시각적인 외관, 조류효과, 전자기 간섭 등의 환경적 영향에 비해 상당히 큰 영향을 미침을 의미한다[2-5].

Table 1에 항공기 결빙과 풍력터빈의 결빙특성의 비교하였다. 이를 통해 항공기 결빙에서 주요 문제는 적운형과 층운형 구름대를 지날 때 발생하는 결빙 조건에서 안전하게 비행하는 것을 입증하는 것임을 알 수 있다. 비행 중 결빙은 공력성능 손실, 비행 조종성 저하, 엔진흡입구 막힘으로 인한 흡입성능 저하, 동체 내부로의 얼음과편 유입으로 인한 내부의 막힘, 항공기 앞 유리의 가시성 문제, 그리고 Pitot Tube 오작동 등의 문제를 포함하고 있다. 항공기 결빙은 갑작스럽고, 치명적이며 초/분 단위의 상대적으로 짧은 시간에 일어난다. 반면에 풍력 터빈 시스템의 결빙은 점진적이며, 치명적이지만 피할 수 없고, 긴 시간에 걸쳐 발생한다. 항공기 결빙은 해면고도에서 12km 고도 사이에서 일어나지만, 풍력 터빈의 결빙은 지상으로부터 250m 부근에서 일어난다. 또한 항공기 결빙에서 가장 취약한 부분은

Table 1. Analogy between aircraft and wind turbine icing

	Aircraft	Wind turbine
General	Sudden, fatal, short	Unavoidable, gradual, long
Cloud	0~12km, supercooled large droplet, ice crystal, uniform free-stream	0~250m, freezing rain & drizzle, turbulent shear boundary layer
Iced area	Leading edge	Leading edge & other areas
Exposed time	45, 30, 45/2 minutes	Hours~days
Anti/de-ice	Boot, hot-air, retrofittable	Hot-air, boot, electro-thermal, natural (using centrifugal force)
Surface ice	Instability due to asymmetric roughness	Fatigue
Instrument	Pitot tube malfunction	Anemometer/wane vane malfunction
Life time	30 years	15~20 years

날개의 앞전에서 일어나는 반면, 풍력발전기는 앞전뿐만 아니라 운영모드에 따라 결빙이 생성되는 위치가 바뀐다.

본 연구에서는 풍력 블레이드의 결빙에 의한 공력영향성과 그에 따른 성능변화를 연구하였다. 풍력 블레이드의 성능 예측을 위하여 실험적인 방법을 사용할 수도 있으나, 규모 및 실제 결빙 환경을 규정하기가 매우 까다롭다. 특히 풍력 블레이드의 경우 결빙이 증식되는데 걸리는 시간이 길기 때문에 적절한 결빙형성 조건을 고려하기가 힘들다. 이러한 이유로 최근 전산해석을 이용한 결빙예측이 많이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 최신 CFD 기법을 통한 전산해석을 통해 결빙 증식 계산을 수행하였다. 또한 복잡한 삼차원 블레이드의 유동을 계산하기 위해서는 막대한 계산용량이 요구되기 때문에, 이를 단순화하기 위하여 블레이드 특정 단면에서의 유동을 고려한 다음 마지막 단계에서 Blade Element Momentum (BEM) 기법을 이용하여 삼차원 블레이드의 동력계수를 계산하였다.

결빙증식 예측을 위하여 액적이 없는 순수한 상태에서의 유동장 해석이 선행되어야 한다. 이를 위해서 전산해석 코드인 ANSYS V13.0 FLUENT를 사용하였으며, 이는 Park[6]에 의해 수행된 연구에 자세히 정리되어 있다. 다음 단계로 액적이 물체에 부딪히는 정량적인 비율인 축적율을 계산하였다. 그 계산 결과를 이용하여 결빙증식 정도 및 형상을 예측할 수 있었으며, 결빙 전/후의 공력계수를 비교 할 수 있었다. 축적

을 및 결빙증식 계산을 위해서 CFD 기법에 기초한 최신 전산해석 코드인 FENSAP-ICE를 사용하였다[6-8]. 두 코드는 공기 유동장의 속도 정보가 FENSAP-ICE에 전달되는 One-Way Loose Coupling으로 연동되어 있다. 또한 2차원 블레이드 단면에 대한 공력계수 정보를 바탕으로 3차원 전체 블레이드에 대한 공력성능을 예측하는 방법인 BEM 기법에 적용시켰으며, 최종적으로 블레이드 전체의 동력계수를 예측하였다[9-11].

## II. 전산해석

### 2.1 액적의 충돌 및 축적율

풍력 블레이드에 발생한 결빙 증식을 계산하기에 앞서 사전에 결빙형상을 결정하는 인자에 대한 연구가 필요하다. 결빙 발생에 영향을 미치는 주요한 인자로는 액적량(Liquid Water Content; 이하 LWC), 액적의 크기(Mean Volume Diameter; 이하 MVD), 속도, 결빙 환경의 온도 및 노출 시간 등이다. 액적량은 단위 체적당 포함된 액적의 질량을 나타내며 액적 크기는 구 형태로 가정된 액적의 직경을 나타낸다[12-13].

유동장 계산 후 풍력 블레이드 표면에 충돌하는 액적의 비율을 정량적으로 예측하기 위해 대기에 존재하는 액적의 특성에 대한 조사가 요구된다. 또한 액적궤적 계산을 위해 액적에 대한 연속 방정식과 운동량 방정식을 이용하였다.

대기 중의 과냉각된 액적들은 크기가 균일하게 분포되어 있지 않은 Langmuir D (가장 큰 액적의 크기는 분포 액적의 평균값보다 2.22배 크며, 가장 작은 액적의 크기는 평균값 보다 3.22배 작음) 분포로 알려져 있으며, 이를 수치적으로 모사하기 위해서는 액적 크기에 대한 반복적인 계산이 요구된다. 액적의 크기를 동일하게 가정한 Mono-disperse 분포에 비해 액적의 분포 편차가 클수록 반복계산 시간이 증가하게 되는 반면 축적율의 경향성은 Mono-disperse와 Langmuir D 분포가 유사하게 나타난다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 계산 시간이 짧은 Mono-disperse 분포를 적용하고 MVD를 고정된 후 계산을 수행하였다[14]. 계산된 액적의 속도와 밀도를 이용하여 액적이 물체에 부딪히는 정량적인 비율인 축적율을 계산할 수 있다[15-16].

대기 중의 과냉각된 액적장을 계산하기 위해 Eulerian 기반의 액적 운동 방정식을 이용하였다. 이는 공기와 액적이 혼합된 다상 유동 모델로

Bourgault 등[16]에 의해 제안되었으며, 액적에 대한 연속 방정식과 운동량 방정식으로 구성되어 있다. 수치기법은 유한 체적법을 기반으로 하였으며, 수식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \overrightarrow{W}_D d\Omega + \int_{\partial\Omega} \overrightarrow{F}_D ds = \int_{\Omega} \overrightarrow{Q}_D d\Omega \quad (1)$$

여기서  $\overrightarrow{W}_D$  는 보존변수이며  $\overrightarrow{F}_D$  는 대류항,  $\overrightarrow{Q}_D$  는 용출항 (Source Term)을 나타낸다.

$$\overrightarrow{W}_D = [\alpha, \alpha u_D, \alpha v_D]^T \quad (2)$$

$$\overrightarrow{F}_D = [\alpha V_D, \alpha u_D V_D, \alpha v_D V_D]^T \quad (3)$$

$$\overrightarrow{Q}_D = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{C_D Re_d}{24K(u_a - u_D)\alpha} \\ \frac{C_D Re_d}{24K(v_a - v_D)\alpha} + \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \left(\frac{1}{Fr^2}\right) g_y \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $\alpha$ 는 액적의 체적비(Volume Fraction)을 나타내며,  $u_D, v_D$ 는 액적의 속도,  $u_a, v_a$ 는 공기의 속도,  $\rho_a, \rho_w$ 는 공기의 밀도, 물의 밀도이다.  $C_D$ 는 아래 식과 같이 구형으로 가정한 액적의 항력 계수를 나타낸다.

$$C_D = \left(\frac{24}{Re_d}\right)(1 + 0.15 Re_d^{0.687}), \text{ for } Re_d \leq 1300 \quad (5)$$

$$C_D = 0.4, \text{ for } Re_d > 1300 \quad (6)$$

위 두 식에서 액적에 관한 레이놀즈 수는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$Re_d = \frac{\rho_w d U_{a,\infty} |V_a - V_D|}{\mu} \quad (7)$$

여기서  $d$ 는 액적의 지름,  $\mu$ 는 공기의 동점성(Dynamic Viscosity)을 나타낸다. 식 (4)에서  $K$ 와 액적의 부력과 중력을 의미하는 Froude수는 다음과 같다.

$$K = \frac{\rho_d d^2 U_{a,\infty}}{18 L_{\infty} \mu_a}, \quad Fr = \frac{\|U_{a,\infty}\|}{\sqrt{L_{\infty} g_{\infty}}} \quad (8)$$

액적 충돌 방정식을 계산한 후 자유류에 포함된 액적의 양에 대해 물리적으로 액적이 물체에 부착되는 비율을 나타내는 축적율(Collection Efficiency)에 관련된 식은 아래와 같다.

$$\beta = \alpha \vec{U}_D \cdot \vec{n} \quad (9)$$

여기서  $\beta$ 는 축적율,  $\vec{n}$ 는 고체 표면의 수직 단위 벡터를 각각 나타낸다[17]. 축적율은 일반적으로 액적이 실제 물체에 부착되어 결빙이 증식되는 물리적 메커니즘을 설명하는 연속 방정식과 에너지 방정식에 적용된다.

### 2.2 결빙증식 예측

액적 충돌 계산 후 결빙증식의 형태는 대표적으로 Rime Ice 및 Glaze Ice로 나타낼 수 있다. Rime Ice는 층운형 구름의 액적의 크기가 작고, 저온, 저속, 낮은 LWC 조건에서 주로 발생된다. 낮은 온도로 인해 액적이 물체의 표면과 충돌함과 동시에 급속히 결빙되고, 최초 결빙된 얼음 층과 지속적으로 축적되는 얼음 층 사이에 공기가 유입되어 우윳빛을 띤다. 반면 Glaze Ice는 대기온도가 0°C 부근의 적운형 구름에서 생성되며, 액적의 크기가 크고 상대적으로 높은 기온과 고속, 높은 LWC에서 발생하며 물체 표면과 충돌함과 동시에 결빙이 되지 않고 표면을 따라 흐르면서 결빙이 생성된다. Rime Ice는 물체와 충돌하는 동시에 결빙됨으로 전단력과 Heat Flux가 고려되지 않는 반면, Glaze Ice를 해석하기 위해서는 전단력과 Heat Flux가 고려되어야 한다. Rime Ice의 경우 결빙 증식 형상은 항공기 표면을 따라 유선형으로 생성되는 반면, Glaze Ice는 매우 불규칙한 형태를 나타낸다. 본 연구에서는 충돌과 동시에 결빙되므로 에너지 방정식을 사용하지 않고 연속 방정식만을 사용한 Rime Ice를 적용하여 해석을 수행하였다. 이에 따라 결빙 증식 방정식은 아래와 같이 간단하게 정의된다[16].

$$\rho_f \left( \frac{\partial h_f}{\partial t} \right) = U_\infty \cdot LWC \cdot \beta \quad (10)$$

액적 충돌 및 결빙 증식에 관한 식 (1)-(10)을 유한차적법과 유한요소법에 기초하여 수치적으로 구현한 최신 결빙 시뮬레이션 코드인 FENSAP-ICE 패키지의 하부 모듈인 DROP3D와 ICE3D를 사용하여 연구를 수행하였다[18].

### 2.3 BEM 기법

BEM 기법은 블레이드 삼차원 형상 주위 전유동장을 모델링하는 기법과 달리, 블레이드의 길이 방향에 대하여 임의의 구간을 선정하여 나누고, 각 구간별 2차원 단면의 유동 결과를 바탕으로

로 3차원 블레이드 전체에 대한 공력계수를 예측하는 방법이다. 이는 정밀 3차원 CFD 계산보다 정확도 면에서는 부족하지만, 막대한 계산용량을 줄일 수 있다는 점과 자유류 속도 대비 블레이드 끝단 회전속도를 나타내는 Tip Speed Ratio(TSR)이 3 이상의 범위를 갖는 경우에는 실제 실험 데이터와 비교하였을 경우, 계산된 성능 특성의 오차 범위가 상당히 작기 때문에 많이 사용되고 있는 기법이다[19-20].

BEM 기법에서는 날개요소(Blade Element) 이론과 운동량 이론이 결합된다. 날개요소 이론의 기초가 되는 두 가지 가정으로는 각 블레이드를 따라 이웃한 블레이드 요소 사이의 간섭을 무시하는 것과 날개요소에 작용하는 힘은 날개요소의 단면 형상의 양력계수 및 항력계수에만 의존하는 것이다. 이에 따라 각 미소 날개요소에 작용하는 힘을 계산하고, 이것을 블레이드 길이 방향에 걸쳐 계산한 것이 날개요소 이론이다.

운동량 이론으로부터 축 유도계수  $a$ , 각 유도계수  $a'$ 를 유도할 수 있다. 3차원 블레이드의 유동조건과 형상조건, 그리고 각 조건들로부터 수행된 CFD 결과를 통해 유도되며, 식 (11)과 같이 표현된다.

$$a = \left( 1 + \frac{4\cos^2\beta}{\sigma' C_L \sin\beta} \right)^{-1}, \quad a' = \left[ \frac{\sigma' C_L}{4\lambda_r \cos\beta} \right] (1-a) \quad (11)$$

여기서 강성계수는  $\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r}$ 이다.  $\lambda$ 는 Tip Speed Ratio이며, 국부 Tip Speed Ratio는  $\lambda_r = \frac{\lambda r}{R}$ 이다.  $\beta$ 는 날개의 비틀림 각(Twist Angle)을 의미한다. 운동량 이론과 날개요소 이론을 결합한 날개요소 운동량 이론, BEM 기법은 최종적으로 아래와 같이 표현된다[9].

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} Q \lambda_r^3 a' (1-a) \left[ 1 - \frac{C_D}{C_L} \tan\beta \right] d\lambda_r \quad (12)$$

여기서  $Q$ 는 날개 끝에서 발생하는 와류에 의한 손실정도를 나타내는 무차원 계수이다.  $a$  및  $a'$ 는 식 (11)을 반복법을 통해 유도한 값을 사용하였다.

본 연구에서는 날개 끝 손실정도( $Q$ )를 1, 항력계수( $C_D$ )를 0으로 지정하여 외부로부터의 손실이 없는 상태로 가정한 후 블레이드 길이방향으로 적분하여 동력계수  $C_P$ 를 도출하였으며, 수치적분은 사다리꼴 근사법칙을 사용하였다.

### III. 해석 결과

#### 3.1 모델링 및 격자생성

풍력 블레이드의 표면에서 발생하는 결빙을 계산하기에 앞서 풍력 블레이드를 모델링하고, 이를 바탕으로 형상정보를 추출하여 격자를 생성하였다. 풍력 블레이드는 NREL 5MW급 모델을 사용하였으며, BEM 기법을 적용시키기 위해 블레이드 특정 구간을 선정하여 해석을 수행하였다. 해석을 위한 구간은 Fig. 1과 같이 에어포일 형상과 거리에 따라 선정하였으며, 블레이드의 Root 부분은 배제하였다. 결빙해석을 위한 격자는 Fig. 2와 같으며, 약 12만개의 정렬격자를 사용하였다. 에어포일 중심부로부터 입구 및 상하 경계면까지 코드 길이의 10배, 출구 경계면까지 코드 길이의 20배의 거리를 두었다. FENSAP-ICE 코드에서는 2차원 해석을 위한 Symmetry 조건 옵션을 제공하므로 이를 이용하여 2차원 계산을 수행하였다. 또한 단순하면서도 정확도가 높은 난류모델을 사용하기 위하여 Spalart-Allmaras를 적용하였다. 유동해석 조건

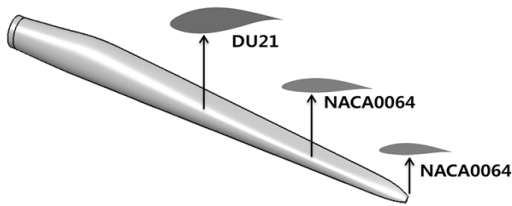


Fig. 1. 3D CAD of NREL 5MW wind turbine blade

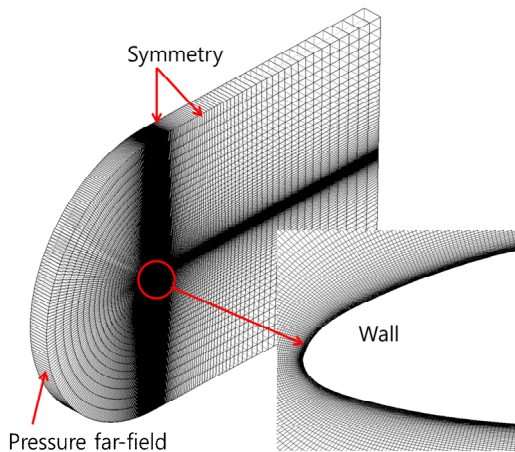


Fig. 2. Global view of mesh

Table 2. Tip speed ratio versus sectional conditions

Tip speed ratio	AoA (deg.)	Relative wind velocity(m/s)
4	13.690	82.11
8	7.101	80.27
16	3.593	79.63

Table 3. Icing analysis conditions

Droplet size, MVD [ $\mu\text{m}$ ]	20
Liquid water content, LWC [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	0.22
Atmospheric air temperatures [K]	263
Wall temperature for numerics [K]	288
Simulation time [minutes]	60

및 결빙 조건은 Tables 2, 3에 제시하였다. NREL 5MW급 정격 풍속조건에서의 출력과 표준 규격으로부터 도출된 조건이며, Table 2는 TSR 별 블레이드 팁에서의 3차원 블레이드의 유동조건과 기하학적 조건으로부터 유도한 조건이다. Table 3에 나타난 벽면온도는 수치계산을 위한 초기가정 값이며 FENSAP-ICE 코드에서 추천하는 값을 사용하였다[6,18].

#### 3.2 전산해석 결과

결빙 증식에 앞서 액적이 없는 상태의 순수한 유동장에 대한 해석을 수행하였으며, 이를 위해 63m 반경을 갖는 블레이드의 회전속도를 12.1 RPM으로 고정한 채 자유류의 속도를 변화시켜 TSR을 지정하였다. 그 결과 TSR이 증가할 경우 자유류에 의한 상대속도는 낮아지고 유입 받음각이 작아지게 된다. 이에 따라 Fig. 3에 알 수 있듯이 TSR이 증가할수록 압력계수의 분포가 에어포일 앞전으로 집중되어 나타나는 것을 확인할

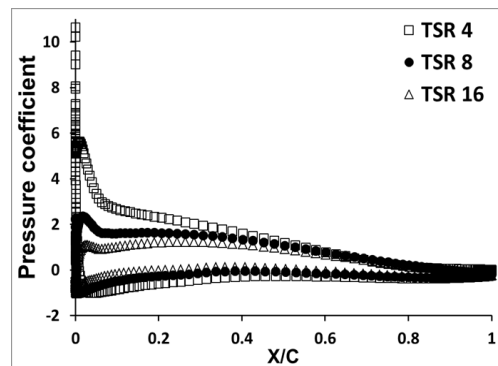


Fig. 3. Pressure coefficients at various tip speed ratios

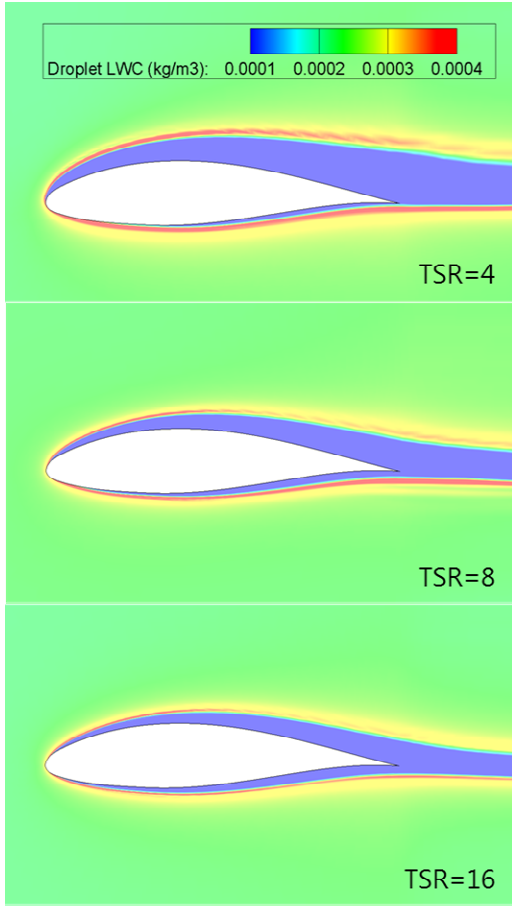


Fig. 4. LWC distributions at various tip speed ratios

수 있다.

Figure 4는 블레이드 팁의 TSR에 따른 LWC 분포 결과이다. TSR 4인 경우 LWC 분포가 에어포일 하단부에서 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. TSR이 높아질수록 그 영역이 에어포일 앞전으로 집중 되는 것을 알 수 있으며, 이는 자유류에 의한 상대속도 및 받음각과 관련이 있는 것으로 판단된다. 또한 LWC 분포는 압력계수 분포와 밀접한 관련 있음을 알 수 있다.

Figure 5의 결과를 통하여 TSR 변화에 따른 축적율의 분포를 확인할 수 있다. 앞서 Fig. 3-5의 결과를 통하여 TSR이 증가할수록 에어포일 앞전 부근에서의 압력계수의 분포가 집중되어 나타나며, LWC 또한 분포 영역이 앞전으로 집중되는 것을 알 수 있었다. 축적율 분포를 살펴본 결과 앞전 결과들과 유사하게 TSR이 높아질수록 축적율이 에어포일 앞전부근에 집중되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. TSR 8, 16에서 급격한

축적율 변화가 나타나는데, 이는 에어포일의 형상, 속도, 받음각 등의 조건으로 인해 국부적으로 액적농도가 급격히 줄어드는 영역이 발생하기 때문이다. 이러한 결과들을 통해서 결빙증식에 중요한 영향을 미치는 축적율은 속도뿐만 아니라, 받음각의 조건에도 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Figure 6은 TSR별 블레이드 팁에서의 결빙 증식 형상을 시각화 한 것이다. 앞서 Fig. 5에서의 축적율 분포 결과와 비교 하였을 때, 매우 유사한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 실제 결빙증식에 축적율 분포가 미치는 영향이 큰 것을 확인하였다. TSR이 높아질수록 상대속도는 낮아지나, 유입속도에 따른 받음각이 작아지므로 에어포일의 앞전 주변으로 유동이 정체되는 것을 알 수 있다. 이에 따라 앞전 주변의 축적율이 높아짐을 확인하였다. 받음각이 큰 경우 에어포일 아랫면에 압력이 고르고 넓게

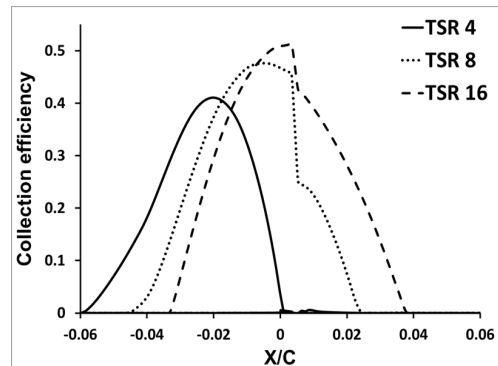


Fig. 5. Collection efficiency at various tip speed ratios

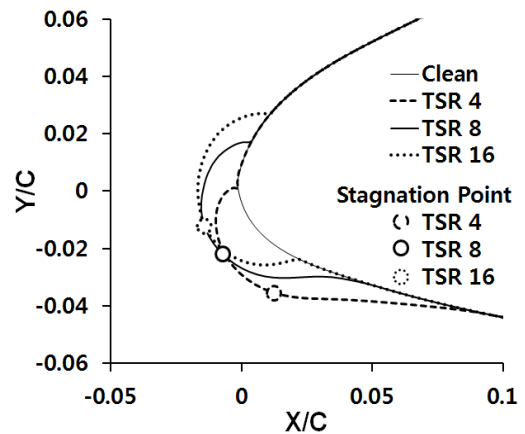


Fig. 6. Effect of tip speed ratio on shape of ice accretion at the blade tip

분포되어 비교적 완만한 형상의 결빙이 생성되며, TSR이 증가함에 따라 앞전 주변으로 정체점이 형성되고 결빙의 형상이 급격하게 변하는 것을 확인하였다. 이를 통해 속도가 결빙의 주요인

사이긴 하나 속도뿐만 아니라 받음각 등의 조건이 결빙생성에 영향을 미침을 확인하였다. TSR이 4인 경우 상대적으로 느리고 받음각이 큰 자유류의 유입으로 인하여 에어포일 앞전을 기준으로 아래쪽에 넓게 퍼진 형태의 결빙증식이 이루어졌으며, TSR이 증가할수록 결빙의 생성 범위는 앞전으로 집중되어 전체 결빙 영역은 좁아지고 두께는 커짐을 확인할 수 있다. 또한 블레이드 팁 부분만 아니라 다른 영역에서의 결빙 또한 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 블레이드 팁에서의 결빙증식 전후의 압력분포를 비교한 그림이다. 양력은 에어포일의 아랫면과 윗면의 압력 차이에 의해 발생하게 된다. 결빙증식 전후의 에어포일 주변 압력분포를 비교한 결과 에어포일의 아랫면과 윗면에서의 압력차이가 결빙 후 상대적으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 결빙 후의 발생 양력이 감소함을 알 수 있다. 또한 앞전에서 발생한 결빙이 에어포일의 형상변화를 일으켜 에어포일 주변의 원활한 유동흐름을 저해한 것으로 판단되며, 양력발생이 원활하게 이루어지는 것을 저해하는 요소로 작용하였을 것으로 판단된다. 마찬가지로 에어포일 주변에서의 원활하지 못한 유동흐름과 증가한 면적은 항력 증가를 야기하는 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

Figure 8-9는 블레이드 팁에서의 TSR 4, 8, 16에 대하여 결빙 전후 받음각 별 양력 및 항력 계수를 나타낸 것이다. 이를 통해 결빙증식 후의 공력계수가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한 BEM 기법을 적용하기 위한 주요 인자인 양력 및 항력 계수의 변화를 통해 풍력 블레이드의 성능변화가 일어날 것임을 짐작할 수 있다. 특히 결빙 후의 양력계수가 감소한 것으로 보아 동력계수가 감소하게 될 것임을 예측할 수 있다. 특히 사항으로는 TSR이 4인 경우 결빙 전후의 양력 및 항력 계수의 차이가 그리 크지 않다는 점이다. 또한 모든 경우 받음각 0-10도 영역에서는 약간이지만 오히려 양력계수가 증가하였음을 알 수 있다. 이를 통해 결빙증식 형상에 따라 결빙이 공력계수 변화에 미치는 영향이 꼭 부정적이지만은 아닌 것을 알 수 있다. 이는 속도 및 받음각에 따른 결빙의 생성위치 및 형태가 달라짐으로 인해 결빙이 공력특성에 미치는 영향이 다르게 나타나기 때문으로 판단된다. 또한 TSR 4인 경우의 결빙 전후의 공력계수 변화가 거의 나타나지 않음을 확인하였으나, 블레이드 팁에서의 결빙의 영향성뿐만 아니라 BEM 기법의 특성상 블레이드 길이방향으로의 적분을 하여 성능변화

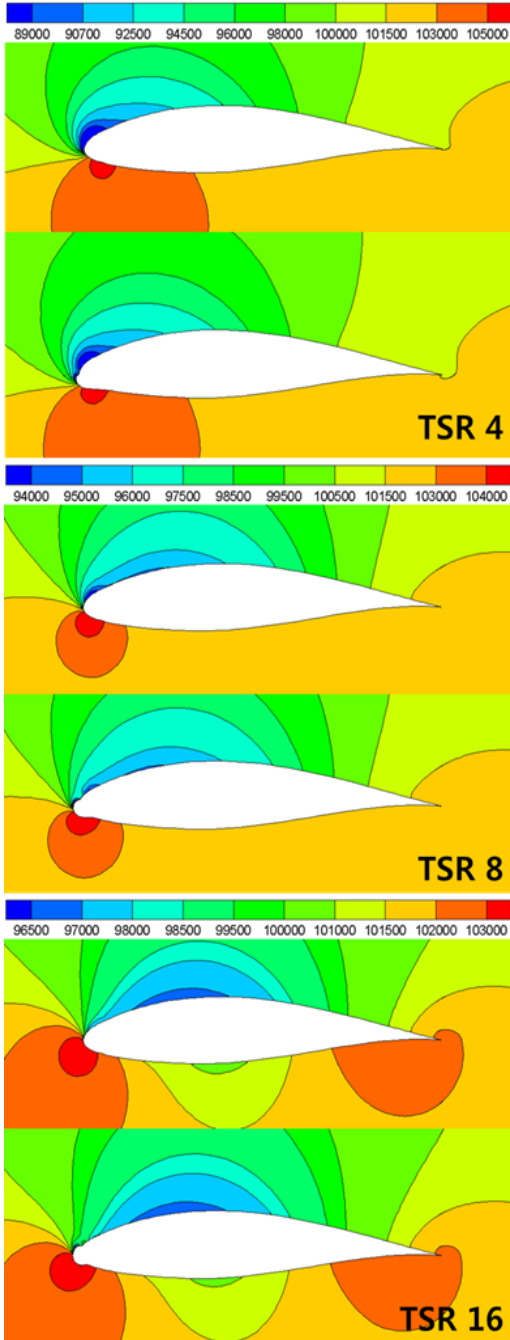


Fig. 7. Comparison of pressure distribution versus tip speed ratio (upper : clean, lower : iced)



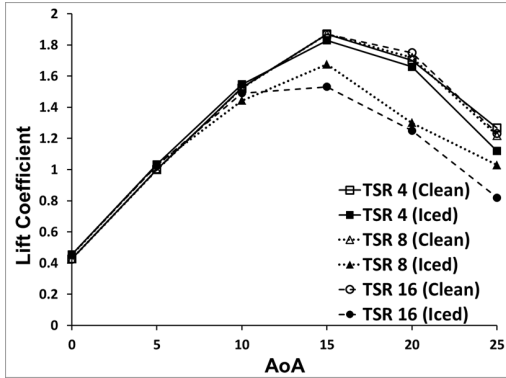


Fig. 8. Comparison of lift coefficient versus angle of attack (clean and iced)

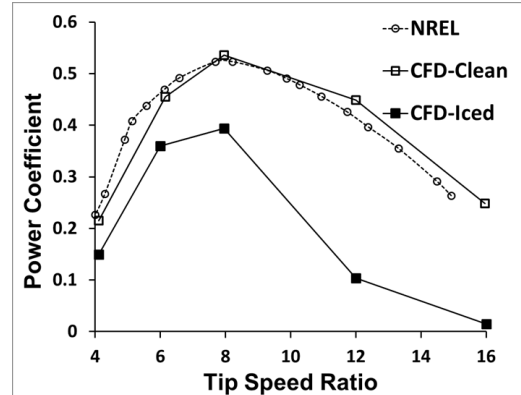


Fig. 10. Comparison of power coefficient versus tip speed ratio (clean and iced)

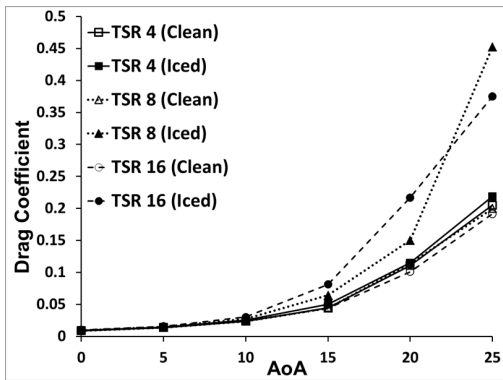


Fig. 9. Comparison of drag coefficient versus angle of attack (clean and iced)

를 예측하기 때문에 블레이드 팁 이외의 모든 영역에서의 변화량을 고려할 경우 상당한 성능변화가 일어날 것으로 예측된다.

### 3.3 BEM 기법을 적용한 동력계수 예측

Figure 10은 풍력 블레이드의 TSR에 대한 동력계수  $C_p$ 를 나타낸 것이다. BEM 기법을 이용하여 도출하였으며, Fig. 8의 받음각 별 양력계수를 이용하였다. 결과는 TSR에 비례하여 급격하게 증가하며, TSR이 8일 때 가장 높은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 그 이상인 경우 다시 감소하는 경향을 보인다. TSR이 4 이하인 경우는 자유류의 속도 및 그에 따른 상대속도는 빠르나, 이에 따른 큰 유입각도로 인하여 상대적으로 낮게 나타났을 것으로 판단된다. 또한 TSR이 8보다 큰 경우는 풍력 블레이드의 자유류 속도 및 상대속도가 느리고 작은 유입각도로 인하여 상대적으로 효율이 낮아지는 것으로 판단된다. 이러한 결과들로 인하여 속도가 높은 것이

발전 성능을 효율적으로 만드는 것이 아님을 알 수 있다. 또한 TSR이 커짐으로 인하여 결빙 전후 동력계수의 차이 정도가 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 TSR이 증가함에 따라 결빙에 의한 공력계수의 차이가 커지기 때문으로 판단된다. 자유류의 속도변화로 인하여 변화한 상대속도 및 받음각의 변화는 일차적으로 결빙증식 위치 및 형상 변화에 영향을 미치게 되고, 이에 따라 공력특성 변화에 차이가 발생하게 된다. 또한 BEM 기법을 적용시킨 경우, 블레이드 전체의 동력계수에도 상당한 영향을 미치는 것을 보여준다. 특히 TSR이 8보다 큰 경우 증가하던 동력계수가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 TSR이 높아질수록 3차원 블레이드에 대한 형상조건과 선택된 블레이드 구간에서의 유동해석 조건(받음각, 속도 등)이 변화하기 때문이다. 이에 따라 BEM에 적용하게 될 경우 식 (11)의 각 유도계수가 1, 축 유도계수가 0에 가까운 값으로 변화하게 된다. 결과적으로 TSR에 따라 증가하던 동력계수는 일정 TSR 이상에서 값이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 결빙 후에는 이러한 현상이 더 크게 적용되어 동력계수가 아주 미미한 값으로 수렴되는 것을 확인할 수 있다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 전산해석 기법을 이용하여 풍력 블레이드 표면의 결빙이 공력특성에 미치는 영향성을 분석하였으며, 이를 바탕으로 블레이드의 성능변화를 예측하였다. 먼저 결빙 해석을 위하여 액적이 없는 상태에서의 유동장 계산을 수행하였으며, 계산된 결과를 바탕으로 일정한 액



적크기를 갖는 Mono-disperse를 가정한 액적 유동장 계산 및 Rime Ice에 대한 결빙증식 계산을 수행하였다. 계산 결과 받음각 및 속도 변화에 따라 결빙생성 위치 및 증식 정도가 달라짐을 알 수 있었다. 또한 블레이드 끝단으로 갈수록 결빙의 정도가 심해지는 것을 확인하였다.

풍력 블레이드의 결빙 전후의 공력특성 변화를 통하여 풍력 블레이드의 동력계수가 변화하는 것을 확인하였다. 특히 풍력터빈의 중심부에서 끝단으로 갈수록 결빙증식 정도가 더 커지게 된다. 이는 결빙의 주요인자중 하나인 공기속도에 따른 영향으로 판단된다. 또한 Tip Speed Ratio의 증가에 비례하여 발전성능이 증가하는 것만은 아님을 확인 할 수 있었다. 그리고 Tip Speed Ratio가 증가함에 따른 결빙생성 위치 및 결빙두께의 변화에 따라 결빙 전후의 동력계수의 차이가 더 커지는 것을 확인하였다. 이는 결빙의 주요인자인 속도의 변화에 따라 결빙증식 정도가 변화하며, 이에 따른 공력특성 변화 때문인 것으로 판단된다. 공력특성 변화 중 양력계수가 감소하는 주된 원인은 결빙증식으로 인해 에어포일의 윗면과 아랫면의 압력차이가 줄어들기 때문이다. 양력계수의 증가 원인은 에어포일 앞전에서 발생한 결빙으로 인하여 에어포일의 공기와의 접촉면적이 증가하기 때문이며, 에어포일 앞전의 급변하는 압력분포의 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다.

향후 Mono-disperse를 이용한 액적장 계산을 확장하여 Langmuir D 분포를 고려한 액적장 계산 및 Glaze Ice 형태의 결빙증식에 대한 계산이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 BEM을 적용하기 위한 2차원 구간을 5개로 선정하였다. 비교적 NERL의 시험값과 비슷한 경향을 보이나, 계산의 정확도를 높이기 위하여 더 많은 2차원 단면을 선정한 후 해석의 질을 높여야 할 것으로 판단되며, 2차원 및 3차원 해석의 차이를 확인하기 위해 3차원에 관한 해석을 추가적으로 수행할 예정이다. 최종적으로 결빙의 공력 영향성 최소화를 위해 풍력 블레이드용 방제빙 시스템 장치 해석 및 설계 기술에 관한 연구가 중요할 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124030200140) 및 한국

연구재단(NRF 2012-R1A1A4A01-010242, 2009-009414)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) Pankaj, K. J., Dwight B., and Sven S., "Wind Turbines under Atmospheric Icing Conditions - Ice Accretion Modeling, Aerodynamics, and Control Strategies for Mitigating Performance Degradation," *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2012.
- 2) Fernando, V., Marcelo, R., and Adrian I., "Numerical Study of Flow Iced Wind Turbine Airfoil," *Engineering Applications of Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 1, 2012, pp. 39-45.
- 3) Barber, S., Wang, Y., Jafari, S., Chokani, N., and Abhari, R. S., "The Impact of Ice Formation on Wind Turbine Performance and Aerodynamics," *European Wind Energy Conference*, 2010.
- 4) Reid, T., Baruzzi, G., Ozcer, I., Switchenko, D., and Habashi, W. G., "Development of a Novel Ice Sensing and Active De-icing Method for Wind Turbines," *51th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2013.
- 5) Myong, R. S., "Atmospheric Icing Effects on Aerodynamics of Wind Turbine Blade," *ASME IMECE2013*, 2013.
- 6) Park, J. H., Jung, K. Y., Myong, R. S., "Computational Prediction of Icing Effects on Aerodynamic Characteristics of a Wind Turbine Blade," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 18, No. 3, 2013, pp. 51-59.
- 7) ANSYS V13.0 FLUENT Basic, TSNE, 2011.
- 8) Yi, T. H., Kim, C. W., "Sensitivity Study of Turbulence Models and Mesh Resolutions for the Airfoil of a Wind Turbine Blade," *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Fall Conference*, 2012, pp. 1011-1016.
- 9) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- 10) Muhammad, S. V., "Numerical Analysis of Atmospheric Ice Accretion on Wind Turbine Blades & Resultant Performance Losses," *The Norwegian Research Council, Department of Technology, Narvik University*

College, Norway, 2010.

11) Kim, B. S., Kim, M. E. and Lee, Y. H., "Predicting the Aerodynamic Characteristics of 2D Airfoil and the Performance of 3D Wind Turbine using a CFD Code," *Transactions of the KSME B*, Vol. 32, No. 7, 2011, pp. 549-557.

12) Jung, S. K., Shin, S. M., Myong, R. S., and Cho, T. H., "An Efficient CFD-based Method for Aircraft Icing Simulation Using a Reduced Order Model," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, 2011, pp. 703-711.

13) Shin, H. B., Choi, W., Seo, S. J., Ryu, J. B., "Study of Icing Accretion on The 2D Airfoil," (in Korean) *Korean Society of Computational Fluid Engineering Spring Conference*, 2009, pp. 21-26.

14) Jung, S. K., Shin, S. M., Myong, R. S., Cho, T. H., Jeong, H. H. and Jung, J. H., "Ice Accretion Effect on the Aerodynamic Characteristics of KC-100 Aircraft," *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, AIAA-2010-1237, 2010.

15) Kind, R. J., Potapczuk, M. G., Feo, A., Golia, C. and Shah, A. D., "Experimental and Computational Simulation of In-Flight Icing

Phenomena," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 34, 1998, pp. 257-345.

16) Gent, R. W., Dart, N. P. Cansdale, J. T., "Aircraft Icing," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 358, 2000, pp. 2873-2911.

17) Bourgault, Y., Habashi, W. G., Dompierre, J., Baruzzi, G. S., "A Finite Element Method Study of Eulerian Droplets Impingement Models," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 4, 1999, pp. 429-499.

18) *NTI Solutions User Manual*, Newmerical Technologies Inc., 2010.

19) Chang, S. M., Lee, J. H., "Aerodynamic Design of 10 kW-level HAWT Rotor Blades," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 35, No. 7, 2007, pp. 884-890.

20) Kim, K. P., Lee, M. W., Kim, M. O., Lee, Y. H., "Design of 5kW-class Small-scale Wind Turbine Using In-house Code POSEIDON," *Wind Energy Journal*, Vol. 1, No. 1, 2010, pp. 26-32.