

풍력 블레이드의 결빙에 의한 공력 영향성 전산 예측

박지호¹, 정기영¹, 명노신^{*2}

¹경상대학교 항공우주특성화대학원

²경상대학교 항공우주시스템공학과 및 항공기부품기술연구소

COMPUTATIONAL PREDICTION OF ICING EFFECTS ON AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A WIND TURBINE BLADE

J.H. Park,¹ K.Y. Jung¹ and R.S. Myong^{*2}

¹Specialized Graduate School of Aerospace Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

²Dept. of Aerospace and System Engineering & Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang Nat'l Univ.

A significant change in aerodynamic characteristics of wind turbine blade can occur by ice formed on the surface of the blade operated in cold climate. The ice accretion can result in performance loss, overloading due to delayed stall, and excessive vibration associated with mass imbalance. In this study, the impact of ice accretion on the aerodynamic characteristics of NREL 5MW wind turbine blade sections is examined by a CFD-based 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 a significant role in the shape of ice accretion. In addition, the computational results are used to assess the degradation in the lift and drag coefficients of the blade sections.

Key Words : 풍력블레이드(Wind Turbine Blade), 전산유체역학(CFD), 공력특성(Aerodynamic Characteristics), 결빙증식(Ice Accretion)

1. 서 론

풍력 발전시스템의 상업적 보급은 전 세계적으로 1990년대 중반 이후 본격적으로 이루어지기 시작하였고, 2012년 말의 총 누적 풍력설비 용량은 대략 282 GW에 달한다. 풍력 시장의 확대와 함께 상업용 풍력 발전시스템의 단위 용량 규모도 1980년대 초의 50 kW급에서 현재 6 MW급으로 120배 정도 증가하였다. 이러한 국제시장의 확대, 신규설비 교체 수요에 따른 리파워링(Repowering), 해상용 풍력발전(Offshore Wind Turbine) 필요성 증가에 힘입어 풍력발전기의 개발 형태도 다양해지고 있다. 육상에서는 풍력발전 설비의 설치장소가 풍황 조건에 의해 해안이나 도서산간 지역으로 한정되어 있고, 경관이나 소음이 무시할 수 없는 문제가 된다. 이러한 환경적

이유와 발전효율을 높일 목적으로 주로 해안 및 도서산간 등의 지역에 풍력 발전 단지가 조성되고 있으며, 이로 인해 많은 풍력 발전기가 가혹한 기후조건 속에서 가동되고 있다[1].

혹한 기후에서 발생하는 높은 풍속과 낮은 온도로 인한 높은 밀도는 일차적으로 풍력발전기의 발전 성능을 향상시킨다. 하지만 대기온도가 낮고 상대습도가 높은 영역에서 공기 중의 액적이 블레이드의 표면과 충돌함으로써 블레이드 표면에 결빙이 발생하게 된다. 이러한 결빙은 양력 감소 및 항력 증가를 야기하고, 발전효율에 부정적인 영향을 미치게 된다. 이로 인하여 풍력발전기의 성능저하(또는 과부하), 무게 중심의 변화에 따른 과도진동, 결빙파편이 지상으로 떨어질 경우의 안전성 문제, 계기의 결빙으로 인한 계기 측정오차, 최악의 경우 풍력 시스템 정지 등의 문제가 발생한다[2,3].

결빙 관련 연구는 1930년대에 그 중요성이 부각되어 시작되었으며, 1940년대에 주로 풍동시험과 비행시험을 바탕으로 결빙에 의한 공력 영향성을 분석하기 시작하였다. Hardy, Messinger, Langmuir 및 Blodgett가 제안한 결빙 증식에 대한 해석기법과 1970년대 이후 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입은

Received: July 11, 2013, Revised: August 9, 2013,

Accepted: August 9, 2013.

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

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.3.051

© KSCFE 2013

전산유체역학을 이용한 결빙증식 시뮬레이션 기법이 개발되었다. 초기에는 미국 NASA Glenn 연구소와 영국의 DRA, 프랑스의 ONERA 등의 선진국을 중심으로 항공기의 결빙현상에 대한 실험적, 이론적 분석을 수행하였으며, 1990년대 후반부터는 캐나다를 필두로 결빙 전산 시뮬레이션 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[4,5].

결빙증식 모델을 수치적으로 모사하기 위해 전통적으로 비점성 패널 기법 및 Euler-경계층 연계 해석 기법을 활용하여 액적의 궤적을 예측하는 Lagrangian 기법이 사용되었다. 하지만 최근에는 Eulerian 기법을 이용한 액적 추적 방식이 선호되고 있다. 비점성 패널기법 및 Euler-경계층 결합 Lagrangian 기반 모델은 계산시간 측면에서 효율적이나 복잡한 형상 및 경계층 연계 시 세심한 주의가 필요한 반면, Navier-Stokes-Fourier 방정식을 이용한 Eulerian 기반 모델은 복잡한 형상 및 경계층에 대한 특별한 고려 없이 적용할 수 있는 장점이 있다. Lagrangian 기법을 이용한 대표적인 결빙 관련 코드로는 NASA의 LEWICE 코드로 결빙 현상 예측, 제빙 및 방빙 장치 설계에 사용되고 있다. 한편 Eulerian 기법으로는 캐나다 McGill 대학 및 NTI사의 Habashi 연구팀에 의해 개발된 FANSAP-ICE가 가장 대표적이다[6,7].

풍력 블레이드 표면에 발생하는 결빙 현상에 대한 인증 절차는 시험과 해석으로 이루어진다. 시험은 지상의 결빙풍동에 의한 인공적 시험과 자연 상태에서의 시험이 있다. 하지만 두 방법 모두 높은 비용과 많은 시간이 소요되며, 장소 및 시간의 제약성으로 인해 이론적인 해석이 병행되어야 한다. 또한 일반적인 풍동시험과는 달리 결빙풍동의 경우 스케일링을 충족시키는 문제, 자연 상태에서의 시험의 경우 풍력발전기에 접근하는 적절한 구름대를 찾는 어려운 문제가 존재한다. 반면 전산해석을 통한 결빙 해석 시뮬레이션은 결빙에 의한 영향성을 정확하게 분석할 수 있고, 스케일링이 문제되지 않는다. 그러므로 상대적으로 비용과 시간 및 장소 측면에서 효율적인 전산해석이 풍동시험 및 자연 상태에서의 시험을 보완할 수 있는 주요 대안이 된다[8-11].

본 연구에서는 풍력 블레이드의 결빙에 의한 공력 영향성을 연구할 목적으로 CFD 기법에 기초한 최신 전산해석 코드인 FENSAP-ICE를 이용하여 먼저 풍력 블레이드의 결빙 증식을 계산하였다. 복잡한 삼차원 블레이드 유동을 단순화시키기 위해 Root, Middle, Tip 단면에서의 유동을 고려하였다. 그리고 과냉각된 액적으로 인한 결빙의 영향성을 분석하기 이전에 순수한 공기에 관한 유동장을 먼저 계산하였다. 과냉각된 액적이 풍력블레이드 표면에 충돌하는 영역을 나타내는 축적율을 계산한 다음, 축적율과 유동장 계산 정보를 바탕으로 결빙증식 형상을 예측하였다. 최종적으로 결빙증식 블레이드 형상에 대해 유동장 재해석을 수행하였으며, 그 결과로부터 블

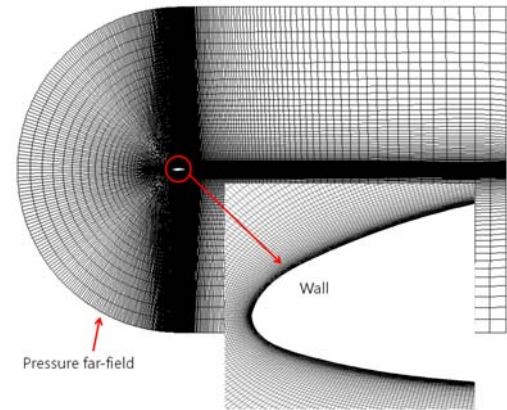


Fig. 1 A global view of 2D mesh for FLUENT

레이드 공력계수에 관한 결빙 영향성을 연구하였다[8].

2. 전산해석 기법 검증

풍력 블레이드에 발생한 결빙 형상을 계산하기에 앞서 전산해석의 기법 검증에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 Delft University of Technology의 Low Speed Wind Tunnel에서 수행된 Phase IV 풍력터빈 블레이드의 실험결과를 바탕으로 검증을 수행하였으며, 검증을 위한 도구로는 상용코드인 ANSYS FLUENT (V13.0)를 사용하였다. 풍동실험 결과와의 비교를 통해 NREL 5 MW급 풍력발전기의 에어포일 해석에 적합한 난류 모델을 선택하였다[12].

검증을 위한 해석수행에서는 Fig. 1과 같은 C형 정렬격자를 사용하였다. 검증을 위해 S809 형상을 사용하였으며, 에어포일 중심부로부터 입구 및 상·하 경계면까지 Chord 길이의 10배, 출구 경계면까지 20배 거리를 두도록 설정하였다. 격자수는 약 12만 개 정렬 격자를 사용하였다. 난류 모델은 단순하면서도 정확도가 높은 Spalart-Allmaras를 적용하였으며, 결빙해석과의 연계를 위하여 에너지 방정식 및 이상기체 방정식을 사용하였다. 그 외 조건으로 속력은 20 m/s, 받음각은 각각 0°, 1.02°, 5.22°, 9.22°, 14.24°, 20.15°를 사용하였다. 검증 결과를 보여주는 Fig. 2, 3에는 대표적인 받음각 0°와 14.24°에 대한 압력계수 분포결과를 나타내었다.

Fig. 2, 3에서는 실제 실험값과 본 연구의 해석 검증 결과가 정성적, 정량적으로 매우 유사함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 실제 해석 모델인 NREL 5 MW급 풍력블레이드의 해석을 수행하였다.

3. 전산해석

풍력 블레이드에 발생한 결빙 증식을 계산하기에 앞서 사

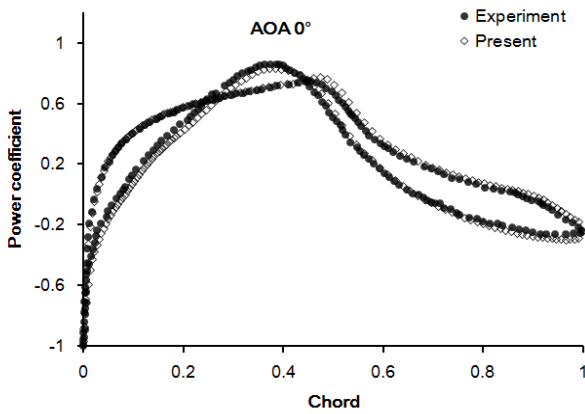


Fig. 2 Validation of S809 airfoil at AoA 0°

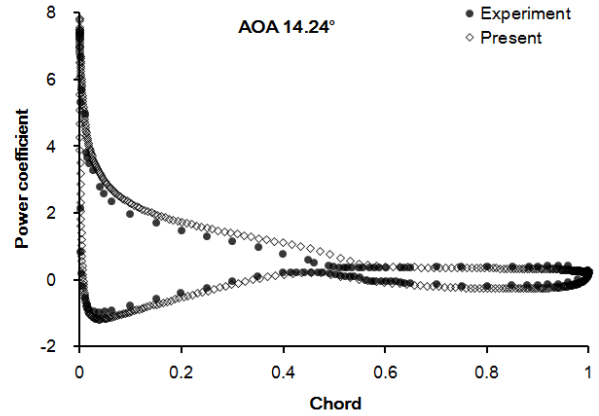


Fig. 3 Validation of S809 airfoil at AoA 14.24°

전에 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 [14,15].

액적에 의한 충돌 및 결빙 증식 예측을 수행하기에 앞서 액적을 고려하지 않은 순수한 유동장에 대한 계산이 선행되어야 한다. 그 후 액적이 물체에 충돌하는 메커니즘을 설명할 수 있는 액적 방정식의 유도 및 축적을 계산, 액적이 물체에 접촉하여 결빙이 증식되는 결빙 증식 계산, 결빙 조건에 노출되어 있는 시간 동안 반복계산 순으로 진행된다. 본 연구에서 사용된 유동장 계산의 지배방정식으로 점성, 압축성 효과를 고려한 3차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하였으며, S809 에어포일 해석과 동일하게 상용 CFD 코드인 ANSYS FLUENT (V13.0)를 사용하였다[16].

유동장 계산 후 풍력블레이드 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[7].

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 평균값보다 3.22배 작음) 분포로 알려져 있으며, 이를 수치적으로 모사하기 위해서는 액적 크기에 대한 반복적인 계산이 요구된다. 액적의 크기를 동일하게 가정한 Monodisperse 분포에 비해 액적의 분포 편차가 클수록 반복계산 시간이 증가하게 되는 반면 축적율의 경향성은 Monodisperse와 Langmuir D 분포가 유사하게 나타난다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 계산 시간이

짧은 Monodisperse 분포를 적용하고 MVD를 고정한 후 계산을 수행하였다[17]. 계산된 액적의 속도와 밀도를 이용하여 액적이 물체에 부딪히는 정량적인 비율인 축적율을 계산할 수 있다[5].

대기 중의 과냉각된 액적장을 계산하기 위해 Eulerian 기반의 액적 운동 방정식을 이용하였다. 이는 공기와 액적이 혼합된 다상 유동 모델로 Bourgault et al.[18]에 의해 제안되었으며, 액적에 대한 연속 방정식과 운동량 방정식으로 구성되어 있다. 수치기법은 유한 체적법을 기반으로 하였으며, 수식 (1) 과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \overline{W_D} d\Omega + \int_{\partial\Omega} \overline{F_D} ds = \int_{\Omega} \overline{Q_D} d\Omega \quad (1)$$

여기서 $\overline{W_D}$ 는 보존변수이며 $\overline{F_D}$ 는 대류항, $\overline{Q_D}$ 는 용출항 (Source Term)을 나타낸다.

$$\overline{W_D} = [\alpha, \alpha u_D, \alpha v_D]^T \quad (2)$$

$$\overline{F_D} = [\alpha V_D, \alpha u_D V_D, \alpha v_D V_D]^T \quad (3)$$

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

여기서 α 는 액적의 체적비(Volume Fraction)을 나타내며, u_D, v_D 는 액적의 속도, u_a, v_a 는 공기의 속도, ρ_a, ρ_w 는 공기의 밀도, 물의 밀도이다. C_D 는 아래 식과 같이 구형으로 가정된 액적의 항력 계수를 나타낸다.

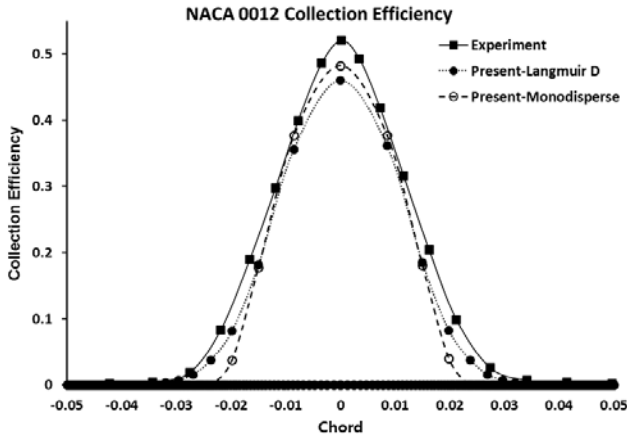


Fig. 4 Validation of collection efficiency of NACA 0012

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

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

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, μ 는 공기의 동점성(Dynamic Viscosity)을 나타낸다. 식 (4)에서 K 와 액적의 부력과 중력을 의미하는 Froude수는 다음과 같다.

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

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

$$\beta = \alpha \overrightarrow{U_D} \cdot \overrightarrow{n} \quad (9)$$

여기서 β 는 축적율, \overrightarrow{n} 는 고체 표면의 수직 단위벡터를 각각 나타낸다[18]. 축적율은 액적이 실제 물체에 부착되어 결빙이 증식되는 물리적 메커니즘을 설명하는 연속 방정식과 에너지 방정식에 적용되며 결빙에 의한 형상 변형을 구현하는데 사용된다.

액적 충돌 계산 후 결빙증식의 형태는 대표적으로 Rime

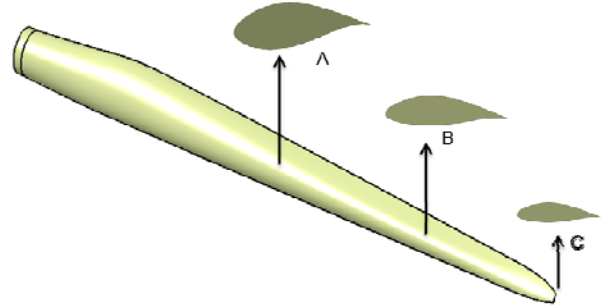


Fig. 5 3D CAD of the NREL 5 MW wind turbine blade and the selected sections

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 우웃빛을 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[20]. Rime Ice의 경우 결빙 증식 형상은 항공기 표면을 따라 유선형으로 생성되는 반면, Glaze Ice는 매우 불규칙한 형태를 나타낸다.

본 연구에서는 대기조건에 따라 Rime Ice를 적용하여 해석을 수행하였다. 이에 따라 에너지방정식은 필요로 하지 않으므로, 결빙 증식 방정식은 아래와 같이 간단하게 정의된다.

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

액적 충돌 및 결빙 증식에 관한 식 (1)-(10)을 유한체적법과 유한요소법에 기초하여 수치적으로 구현한 최신 결빙 시뮬레이션 코드인 FENSAP-ICE 패키지의 하부 모듈인 DROP3D와 ICE3D를 사용하였다[7].

계산 코드의 검증을 위해 Fig. 4와 같이 NACA0012에 대하여 축적율을 실험 결과와 비교하였다. Monodisperse의 경우 Langmuir D 분포에 비해 정성적 측면에서 약간의 차이를 보이나, 에어포일 앞전에서의 최대 축적율이 정량적으로 실험결과에 더 근접함을 확인하였다. 이러한 사실과 해석시간의 단축을 위하여 액적의 크기를 Langmuir D 분포가 아닌 Monodisperse로 가정하였다[21].

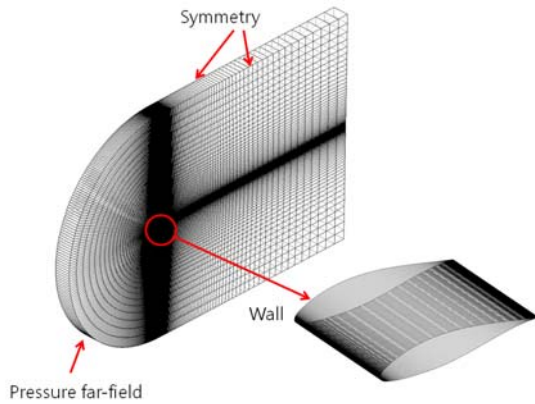


Fig. 6 A global view of mesh for FENSAP-ICE

4. 해석 결과

4.1 모델링 및 격자생성

풍력 블레이드의 표면에서 발생하는 결빙을 계산하기 위해 풍력 블레이드의 구간별 2차원 단면을 모델링하고, 이를 바탕으로 형상정보를 추출하여 격자를 생성하였다. 풍력 블레이드는 NREL 5MW급 모델을 사용하였으며, Fig. 5와 같이 A, B, C 3개의 구간을 선정하여 결빙해석을 수행하였다. Root 부근 단면에서의 결빙은 코드길이의 약 0.001% 이하로 생성되어 결빙의 효과가 매우 적었기 때문에 비교에서 제외하였다. 결빙해석을 위한 모델링 및 격자계를 Fig. 6에 나타내었다. 앞서 풍력블레이드 전산해석 기법의 검증에 위한 2차원 해석 수행 시와 동일하게 유동장의 경계조건을 설정하였으며, FENSAP-ICE 계산용 격자계를 구성하기 위해 Symmetry 조건을 추가하였다. 계산을 위해 약 12만 개의 정렬격자를 사용하였다. 유동해석 조건 및 결빙 조건은 Table 1, 2에 제시하였다. NREL 5 MW급 정격 풍속조건에서의 출력과 표준 규격으로부터 도출된 조건이며, Tip Speed Ratio를 8로 가정한 조건이다. 여기서 R은 블레이드 Root에서 단면까지의 거리이며, V는 에어포일 단면에서의 속도이다.

Table 1 Section conditions

	R(m)	Twist (deg.)	Chord (m)	AOA (deg.)	V (m/s)
Case 1	36.35	5.361	3.502	17.667	45.84
Case 2	52.75	1.526	3.010	10.060	66.64
Case 3	62.90	0.000	0.700	7.156	79.64

Table 2 Icing analysis condition

Free Stream Wind Velocity [m/s]	10
Droplet Size, MVD [μm]	20
Liquid Water Content, LWC [g/m^3]	0.22
Atmospheric Air Temperatures [K]	263
Wall Temperature [K]	288
Simulation Time [minutes]	60

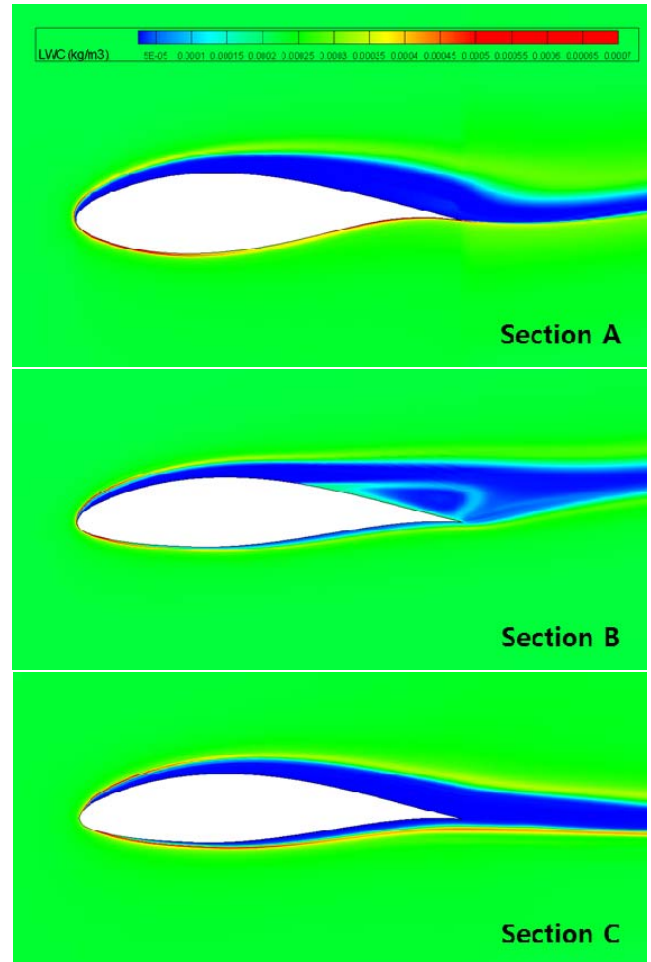


Fig. 7 LWC distributions at each sections

4.2 전산해석 결과

Section A에 사용된 에어포일은 DU21, Section B와 C에는 NACA64가 사용되었다. Table 1과 2의 유동해석 조건을 적용하여 전산해석을 수행하였다.

Fig. 7은 각 Section 별 에어포일 주변의 LWC 분포를 나타낸 것이다. Table 1에 제시되어 있는 속도 및 받음각의 정도에 따라 분포가 다양하게 나타남을 확인할 수 있다. 받음각이 가장 큰 Section A는 고받음각 영역이기 때문에 에어포일 하단부에 걸쳐 LWC가 높게 나타남을 확인할 수 있으며, Section B와 C에서는 에어포일 앞전에서의 LWC가 비교적 높게 나타남을 확인할 수 있다. 각 Section 별로 LWC 분포를 살펴보면 결빙이 생성되는 부분을 예측할 수 있다. LWC의 분포를 분석해 보면 Section A에서는 에어포일 하단부에 골고루 결빙이 생성되며 B를 거쳐 C로 갈수록 앞전부분에서 결빙이 생성될 것임을 예측할 수 있다. LWC 분포가 낮게 나타나는 영역은 Shadow 영역으로서 결빙이 생성되지 않는 부분을 뜻한다.

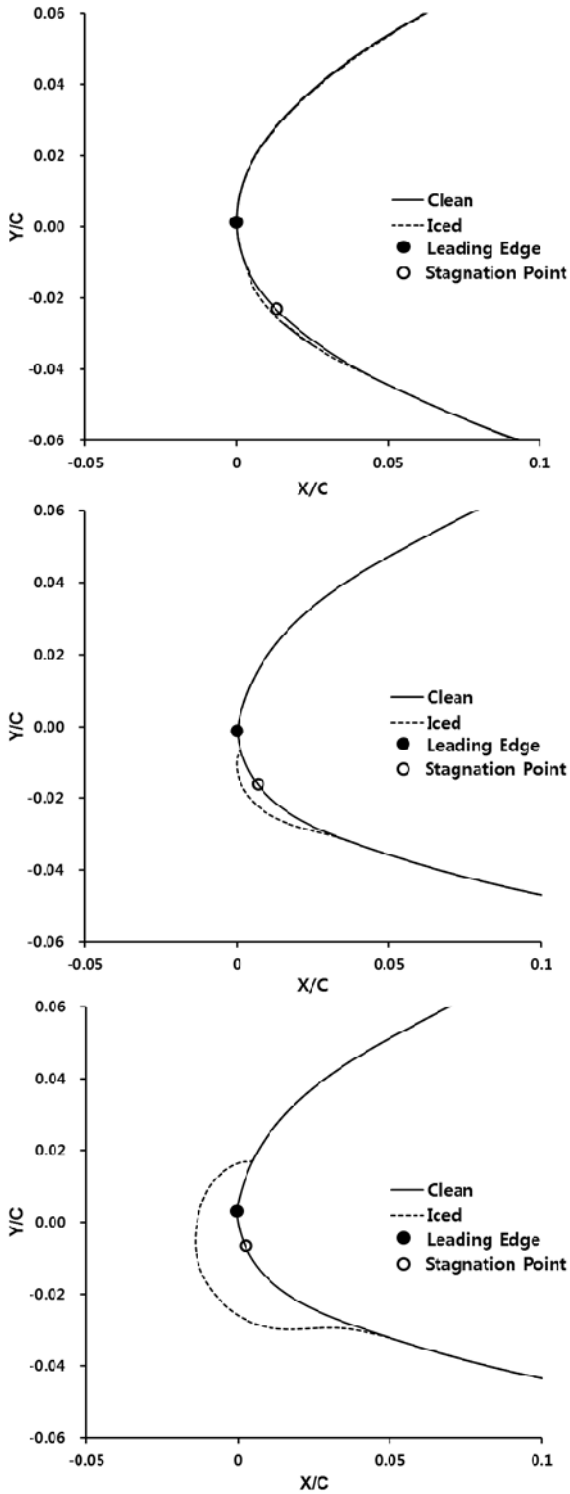


Fig. 8 Shape of ice accretion at each section along NREL 5 MW wind turbine blade

결빙이 증식되었을 경우 공력특성 변화가 일반적으로 각 Section 별로 다르게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 결빙 증식 형상은 Fig. 8과 같으며 결빙의 두께는 대략 Section A에서

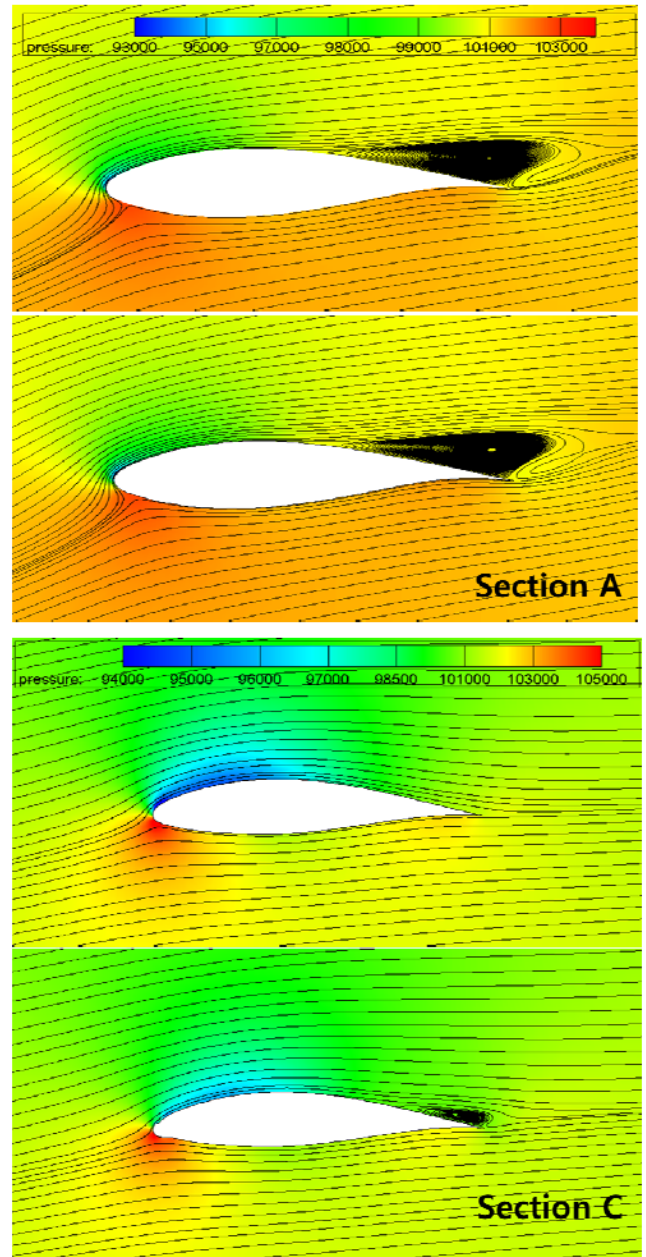


Fig. 9 Pressure distributions and stream-lines at section A and C (upper : clean, lower : iced)

6 mm, B에서 11 mm, C에서 22.5 mm로 예측되었다. 이는 각 구간별 코드길이의 0.002%, 0.004%, 0.032%에 해당하며, 결빙 증식 정도는 유입공기 속도와 밀접하게 관련되어 있음을 확인할 수 있다. 결빙의 두께는 FENSAP-ICE의 하부 패키지인 Viewmerical을 이용하여 도출하였다.

Fig. 8은 각 Section 별 에어포일 단면에 생성된 결빙 형상을 보여준다. Fig. 7의 LWC 분포와 비교해 보면 LWC 분포와 결빙생성이 매우 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. LWC 분포와 관련하여 분석해 보면, Section A에서는 속도가 비교적

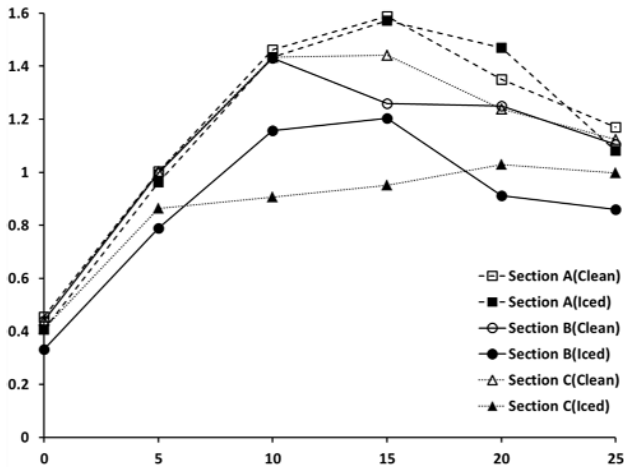


Fig. 10 Comparison of lift coefficient versus angle of attack (clean and iced)

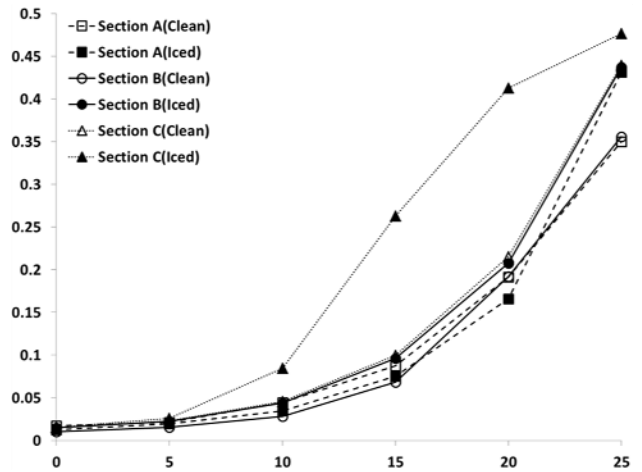


Fig. 11 Comparison of drag coefficient versus angle of attack (clean and iced)

느리고 고 받음각 영역이기 때문에 액적분포가 에어포일의 앞전보다 아랫면에 넓게 이루지고, 따라서 결빙이 얇고 넓게 증식되었음을 알 수 있다. 반면에 Section B와 C에서는 공기의 속도가 비교적 빠르고 저 받음각 영역이므로 액적분포가 에어포일의 앞전 주위에 집중되어 축적률이 크게 나타났음을 알 수 있다. 이는 정체점 부근에서의 축적률이 높게 나타나며, 결빙의 증식 또한 정체점 부근에서 많이 이루어지기 때문이다. Section C에서 코드 길이가 다른 단면에 비해 4배 이상 작았으므로 코드 길이가 대비 결빙 증식 정도가 매우 크게 나타났다. 이로 인해 양력 및 항력 계수가 가장 크게 변화할 것임을 예측할 수 있다.

Fig. 9는 Section A와 C에서의 에어포일 앞전 결빙 발생 전/후의 압력 및 유선 분포를 나타낸다. Section A의 경우 생성된 결빙의 양이 매우 적었으므로, 결빙 전/후의 압력 및 유선 분포의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다. 또한 에어포일 뒷전에서의 유동박리가 심하게 일어난 것을 볼 수 있는데, 이는 유입 받음각이 크기 때문인 것으로 판단된다. Section C에서는 결빙 전/후의 압력 및 유선 분포가 많이 변화하였으며, 이로 부터 에어포일에 발생한 결빙이 큰 공력특성 변화를 야기할 것으로 예측할 수 있다. 위 Fig. 9의 압력 및 유선분포를 분석한 결과 결빙 후 에어포일 아랫면과 윗면에서의 압력의 차이가 감소하였음을 알 수 있으며, 이로 인해 양력계수가 감소할 것임을 예상할 수 있다. 또한 에어포일 앞전에 생긴 결빙으로 인하여 뒷전에서의 유동박리가 일어남을 관찰할 수 있으며, 이로 인해 상당한 항력계수의 증가를 야기할 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 10, 11은 Section A-C의 결빙 전/후의 양력 및 항력 계수를 받음각 5도 간격으로 나타낸 것이다. 결빙 전/후의 양력 및 항력 계수 비교결과 그 값이 고 받음각 영역에서 크게 변

화한 것을 알 수 있다. 또한 모든 Section에서 최대양력계수 $C_{L,max}$ 가 감소한 것을 확인할 수 있으며, Section A를 제외한다면 나머지 경우에서 $C_{L,max}$ 가 나타나는 받음각이 변화한 것을 알 수 있다. Section A의 경우 결빙 전/후의 양력계수 변화가 거의 없음을 확인할 수 있으며, 받음각 20도일 때는 결빙 후의 양력계수가 오히려 약간 높게 나타나는 특이성을 보여주었다. 이는 결빙의 증식 정도 및 형상에 따라 공력특성에 미치는 영향이 항상 부정적인 것만은 아님을 보여준다. Section B와 C에서는 결빙증식으로 인해 양력계수가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

결빙에 의한 항력계수의 변화도 양력계수 변화와 비슷한 경향을 보여주었다. Section A에서 받음각 20도일 경우 항력계수가 약간 감소함을 확인하였지만, Section A와 B의 전체적인 경향성 측면에서는 항력계수가 증가하였음을 알 수 있다. 특히 Section C의 경우는 항력계수가 매우 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 9의 압력 및 유선 변화결과에서 보듯이 에어포일 앞전에 발생한 결빙으로 인하여 뒷전에서의 유동박리가 발생한 것이 그 주된 원인으로 판단된다.

또한 Section C에서의 양력 및 항력계수가 결빙에 의해 크게 변화하는 것은 블레이드 끝단의 코드 길이가 짧은 사실과 빠른 속도로 인하여 상대적으로 더 많은 결빙이 증식되었기 때문이다. Fig. 10, 11의 결과를 통해 속도가 결빙증식의 주요 인자임을 다시 확인할 수 있으며, 이에 따른 결빙 형상 및 위치가 공력계수 변화에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 전산해석 기법을 이용하여 고체표면의 결빙

이 풍력 블레이드 공력에 미치는 영향성을 계산하였다. 먼저 결빙 해석을 위하여 액적이 없는 상태에서의 유동장 계산을 수행하였으며, 계산된 결과를 바탕으로 일정한 액적크기를 갖는 Monodisperse를 가정한 액적 유동장 계산 및 Rime Ice에 대한 결빙증식 계산을 수행하였다. 계산 결과 받음각 및 속도 변화에 따라 LWC 분포가 달라짐을 확인하였고, 그에 따라 결빙생성 위치 및 증식정도가 달라짐을 알 수 있었다. 또한 블레이드 끝단으로 갈수록 결빙의 정도가 심해지는 것을 확인하였다.

풍력 블레이드 표면에 발생한 결빙을 감안한 공력 계산을 통해 결빙이 풍력 블레이드의 공력성능에 지대한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 특히 블레이드의 끝단은 Root 부분에 비해 공기속도가 증가하여 끝단으로 갈수록 결빙의 두께가 두꺼워지게 된다. 이는 결빙의 주요인자 중 하나인 속도에 의한 영향성과 직접적 관련이 있다. 또한 결빙증식에 의해 거의 대부분의 경우 양력계수가 감소하고 항력계수가 증가함을 알 수 있었다. 양력계수의 감소 및 항력계수의 증가 정도는 풍력블레이드의 Root 부분에서 끝단으로 갈수록 더 커짐을 알 수 있었으며, 이는 결빙증식의 크기 및 생성위치와 밀접한 관련이 있다. 양력계수가 감소하는 주된 원인은 결빙증식으로 인해 에어포일의 윗면과 아랫면의 압력차이가 줄어들기 때문이며, 항력계수가 증가하는 원인은 에어포일 앞전에서 발생한 결빙으로 인하여 뒷전에서 유동박리가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

향후 Monodisperse 가정을 제거한 Langmuir D 분포를 고려한 액적장 계산 및 Glaze Ice 형태의 결빙증식에 대한 계산이 필요할 것으로 판단된다. 또한 2차원과 3차원 해석의 차이는 분명히 존재할 것으로 예상하여 향후 3차원에 관한 해석을 추가적으로 수행할 예정이다. 나아가 결빙증식으로 인한 풍력 블레이드의 전체 발전효율 변화에 관한 계산이 필요할 것으로 판단된다. 최종적으로 결빙의 공력 영향성 최소화를 위해 풍력 블레이드용 방/제빙 시스템 장치 해석 및 설계 기술에 관한 연구가 중요할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단(NRF 2012-R1A1A4A01-010242 및 2012-048078)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

[1] 2012, Oh, M.W. and Kim, D.H., "Design and Computational Analysis of Small Vertical-Axis Wind Turbine for Ocean

Buoy System," *The Wind Engineering Institute of Korea*, Vol.16, No.2, pp.49-45.

[2] 2012, Fernando, V., Marcelo, R. and Adrian, I., "Numerical Study of Flow Iced Wind Turbine Airfoil," *Engineering Applications of Fluid Mechanics*, Vol.6, No.1, pp.39-45.

[3] 2010, 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.

[4] 2000, Gent, R.W., Dart, N.P. and Cansdale, J.T., "Aircraft Icing," *Phil. Trans. R. Soc. Lond*, Vol.358, pp.2873-2911.

[5] 1998, 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, pp.257-345.

[6] 2010, Jung, S.K., Myong, R.S. and Cho, T.H., "An Eulerian-Based Droplet Impingement and Ice Accretion Code for Aircraft Icing Prediction," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.15, No.2, pp.71-78.

[7] 2010, NTI Solutions User Manual, Newmerical Technologies Inc.

[8] 2002, Papadakis, M., Hung, K.E., Vu, G.T., Yeong, H.W., Bidwell, C.S., Breer, M.D. and Bencic, T.J., "Experimental Investigation of Water Droplet Impingement on Airfoils, Finite Wings, and an S-Duct Engine Inlet," *NASA TM-2002-211700*.

[9] 2011, Jung, S.K., Lee, C.H., Nagdewe, S., Myong, R.S. and Cho, T.H., "A Study on Truncated Flapped Airfoil for Efficient Icing Wind Tunnel Test," (in Korean) *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.39, No.6, pp.481-486.

[10] 2012, An, Y.G. and Myong, R.S., "Scaling Methods for Icing Wind Tunnel Test," (in Korean) *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.40, No.2, pp.1-8.

[11] 1997, Tezok, F. and Ernest, F., "Icing Tunnel Testing Methodology: Pre-Test CFD, Tunnel Peculiarities, Scaling Effects," *Proc. of The Aerodynamics Symposium*, Vol.6, pp.81-100.

[12] 2008, 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, pp.549-557.

- [13] 1997, Sommers, D.M., "Design and Experimental Results for the S809 Airfoil," *NREL/SR-440-6918*.
- [14] 2011, 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, pp.703-711.
- [15] 2009, Shin, H.B., Choi, W., Seo, S.J. and Ryu, J.B., "Study of Icing Accretion on The 2D Airfoil," (in Korean) *Korean Society of Computational Fluid Engineering Spring Conference*, pp.21-26.
- [16] 2011, ANSYS V13.0 FLUENT Basic, TSNE.
- [17] 2010, 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*.
- [18] 1999, Bourgault, Y., Habashi, W.G., Dompierre, J. and Baruzzi, G.S., "A Finite Element Method Study of Eulerian Droplets Impingement Models," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.4, pp.429-499.
- [19] 2003, Beaugendre, H., Morency, F. and Habashi, W.G., "FENSAP-ICE's Three-Dimensional In-Flight Ice Accretion Module: ICE3D," *Journal of Aircraft*, Vol.40, No.2, pp. 239-247.
- [20] 2010, Lee, C.H., Shin, S.M., Jung, S.K., Myong, R.S., Cho, T.H., Jung, J.H. and Jeong, H.H., "Icing Effects on Aerodynamic Characteristics of the Main Wing Section of KC-100 Aircraft," *Proc. of the 2010 KSCFE Spring Conference*, pp.323-362.
- [21] 2003, Silveria, R.A., Malika, C.R., Estivam, D.A. and Mendes, R., "Evaluation of Collection Efficiency Methods for Icing Analysis," *International Congress of Mechanical Engineering, COBEM2003-1810*.