



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

블레이드 팁 에어포일의 전연 부
손상이 풍력터빈의 연간발전량에
미치는 영향

제주대학교 대학원

풍력공학부 풍력기계시스템 전공

한 우 범

2017年 2月

블레이드 팁 에어포일의 전연 부 손상이 풍력터빈의 연간발전량에 미치는 영향

指導教授 金 範 錫

韓 宇 範

이 論文을 風力工學部 碩士學位 論文으로 提出함

2016 年 12 月


韓宇範의 風力工學部 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

委 員

委 員

김범석
김범석
최정현



濟州大學校 大學院

2016 年 12 月

Effect of Damages at the Leading Edge of Blade Tip Airfoils on the Annual Energy Production of Wind Turbines

Woo-Beom Han
(Supervised by professor Bum-Suk Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science

2016. 12.

This thesis has been examined and approved.



Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. Faculty of Wind Energy Engineering



Thesis director, Bum-Suk, Kim, Prof. Faculty of Wind Energy Engineering



Thesis director, Jong-Chul Huh, Prof. Mechanical Engineering

2016. 12. 19

Date

Faculty of Wind Energy Engineering

Graduate School

Jeju National University

목 차

List of Figures	
List of Tables	
Abstract	1
I. 서 론	2
1.1 연구배경	2
1.2 연구목적	4
II. 에어포일의 공기역학적 특성 및 결빙 이론	6
2.1 유동박리에 의한 실속현상	6
2.2 Reynolds 수와 항력계수의 상관관계	7
2.3 결빙 성장률(rate of ice growth)	9
2.4 Collection efficiency의 특징	10
III. 시뮬레이션 모델 및 블레이드 손상상태 정의	12
3.1. 시뮬레이션 모델 선정	12
3.1.1 에어포일 모델 선정	12
3.1.2 풍력터빈 모델 선정	13
3.2 블레이드 손상상태 정의	14
3.2.1 블레이드 오염현상(Contamination)	14
3.2.2 블레이드 마모현상(Erosion)	15
3.2.3 블레이드 결빙현상(Icing)	16
IV. 팁 에어포일 전연 부 손상상태에 따른 공력성능 분석	20
4.1. 수치해석 조건 선정	20
4.1.1 난류모델 선정	20
4.1.2 격자	21
4.1.3 경계조건	24
4.1.4 결빙 해석기법 검증	24
4.1.5 ESGR(Equivalent Sand Grain Roughness)	27

4.2 CFD 결과 및 고찰	30
4.2.1 오염 및 마모조건 공력성능 분석	30
4.2.2 착빙(Ice accretion)	33
4.2.3 결빙조건 공력성능 분석	39
IV. 블레이드 손상상태에 따른 AEP 감소율	42
1. AEP 산출 조건	42
2. AEP 감소율 분석	43
V. 결론	46
참고문헌	47

LIST OF FIGURES

- Fig. 1-1 Damages at the leading edge of wind turbine blades
- Fig. 1-2 Number of recorded accident of blade damages from 2002 - 2014
- Fig. 2-1 Boundary layer in flow over airfoil surface
- Fig. 2-2 Boundary layer separation and recirculation phenomena
- Fig. 2-3 Drag characteristic of Various bodies
- Fig. 2-4 Air streamlines droplet around a cylindrical object
- Fig. 2-5 Effect of airfoil angle of attack on local collection efficiency
- Fig. 2-6 Effect of airfoil Thickness on local collection efficiency
- Fig. 3-1 Lift coefficient of NACA64-series airfoil under clean and rough condition
- Fig. 3-2 NREL 5MW wind turbine blades composed of various airfoils
- Fig. 3-3 Erosion conditions at the leading edge of a Vestas V 47 blade
- Fig. 3-4 Ice form at the leading edge of airfoil (left : rime ice, Right : glaze ice)
- Fig. 4-1 Lift - drag ratios in various turbulence models
- Fig. 4-2 Boundary condition used in the CFD simulation for contamination and erosion
- Fig. 4-3 Boundary condition used in the CFD simulation for icing
- Fig. 4-4 Verification of an CFD analysis method through comparison with experiment data and CFD result
- Fig. 4-5 Shape and density parameters used for calculating the ESGR
- Fig. 4-6 Variation in lift coefficient with surface conditions of the blade
- Fig. 4-7 Velocity contour around airfoil with Erosion condition(Case12 - Heavy)
- Fig. 4-8 Mass of ice accumulated at the blade tip area
- Fig. 4-9 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section A)
- Fig. 4-10 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section B)
- Fig. 4-11 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section C)
- Fig. 4-12 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section D)
- Fig. 4-13 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section E)
- Fig. 4-14 Lift-Drag ratio with different angle of attack under clean and ice conditions
- Fig. 4-15 Velocity contour around airfoil with icing condition(Section E)
- Fig. 4-16 Variation in lift and drag coefficient with ice condition
- Fig. 5-1 Effects of surface erosion conditions on output power (Clean, Case10, Case12)
- Fig. 5-2 AEP loss under various airfoil surface conditions
- Fig. 5-3 Lift-Drag reduction ratio under various airfoil surface conditions

LIST OF TABLES

Table 3-1 Definition of contamination conditions

Table 3-2 Definition of erosion conditions

Table 3-3 Definition of CFD simulation condition for icing

Table 3-4 Chord length and Relative velocity for Simulation Case

Table 4-1 Result of mesh dependency test for contamination and erosion simulation

Table 4-2 Result of mesh dependency test for icing simulation

Table 4-3 Icing condition used in the wind tunnel test

Table 4-4 ESGR for various S_f

Table 4-5 Results of the wind tunnel test and CFD simulations for Various S_f

Table 4-6 Error rates of drag coefficient under various contamination and erosion conditions at the leading edge of airfoil

Table 4-7 Error rates of lift coefficients under various contamination and erosion conditions at the leading edge of airfoil

Table 4-8 Error rates of lift and drag coefficient under icing conditions at the leading edge of airfoil

1. Abstract

Blade damages such as contamination, erosion and icing are emerging as the major problem in these days. These phenomenons occur mainly at the blades tips which are exposed to wind with high angular velocity and it is evitable for wind turbine to prevent power loss without efficient planning of O&M (Operating and Maintenance). Therefore, systematic planning of O&M must be established by collecting the pertinent quantitative data for blade damages.

This study analyzed the effect of damages at the leading edge of blade tip airfoil(NACA64618) on the aerodynamic performance through transient CFD simulation and AEP calculation was performed for NREL 5MW reference wind turbine to obtain the corresponding AEP loss. The CFD simulation result presented different aerodynamic deterioration depending on the severity of damage conditions. The more severer the blade surface damages, the more aerodynamic performance was deteriorated. For the blade with various damage conditions at the leading edge of the airfoil, The range of lift coefficient reduction is from 1% to 53%, and the range of drag coefficient increase is from 34% to 314%, compared with those of a clean airfoil.

The maximum rate of AEP loss under contamination conditions is 7.0% and that under erosion conditions is 6.8% and that under icing condition is 2%. The trend of AEP loss corresponded with reduction of lift-drag ratio at the lower-than-rated wind speed conditions. However, such a trend was not seen at the higher-than-rated wind speed conditions due to the pitch control system of the wind turbine. Overall, the calculated AEP loss ranged from 2% to 7.0% depending on the extent of damage at the leading edge.

I. 서 론

1.1 연구배경

풍력터빈을 구성하는 블레이드는 출력 및 하중을 동시에 발생시키는 가장 핵심적인 부품 중 하나로, 풍력터빈의 구조 안정성 및 출력효율에 직접적인 영향을 끼친다. 특히 장기간 운전되는 풍력터빈은 온도, 습도, 대기 중 미립자, 풍속, 설치지역에 따라 블레이드 손상 및 파손이 발생할 우려가 있으며, 이상과 같은 현상은 풍력터빈의 하중지지 능력 및 공기역학적 성능저하, 소음, 에너지 생산 등에 악영향을 미칠 것으로 예상된다. 대표적인 블레이드 손상으로는 Figure 1-1과 같이 오염, 마모, 결빙 등이 있으며 이 외에 낙뢰로 인한 파손이 있다.

블레이드 표면오염은 사막지역과 같은 Sandstorm이 발생하는 지역이나 곤충이 서식하기 좋은 환경에서 주로 나타난다. 오염물 증착으로 인한 표면 Roughness 증가는 에어포일의 공기역학적 특성을 악화시킴으로써, 풍력터빈의 출력 및 하중 변화에 심각한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.[1]

Mohammed G. Khalfallah 등은(2007) 먼지입자에 의한 블레이드 전연 부 오염이 출력성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 사막지역에 설치된 300kW급 풍력터빈을 이용한 연구를 수행하였다.[2] 이들이 제시한 결과에 따르면, 오염물 증착은 주로 Leading edge 정체 점 부근에서 집중되어 발생되며 오염수준이 심각할수록 출력 성능저하가 더욱 크게 발생한다는 사실을 제시하였다. Corten and Veldkamp(2001) 등은 곤충이 번식하기 쉬운 외부환경조건에서 오염물 증착이 활발히 발생된다는 사실을 보고하였으며, 곤충에 의한 블레이드 표면오염은 최대 25%의 출력 손실을 초래한다는 결과를 제시하였다.[3,4] active stall type인 1.5MW 풍력터빈을 대상으로 블레이드 전연 부 오염상태변화에 따른 출력성능 측정된 결과, 가장 심각한



Fig. 1-1 Damages at the leading edge of wind turbine blades

오염상태에서 연간발전량 감소율이 약 13%에 이른다는 결과도 보도되었다.[5]

마모현상은 대기 중의 빗방울, 미립자, 우박, 먼지, 모래 등이 블레이드 표면에 충돌하여 발생하는 현상으로 블레이드 표면 형상 변형 및 표면거칠기 변화에 주된 원인이 된다.

EDP renewable 사에서 보도된 풍력터빈 67기에 대한 점검보고서에 의하면, 약 87%의 블레이드에서 전연 부 마모현상이 나타났으며, 약 97%의 블레이드가 먼지와 기름에 의한 오염현상이 확인되었다.[6] 이처럼 오염 및 마모현상은 장기간 운전되는 풍력터빈에서 쉽게 발생되며 적절한 유지보수가 이루어지지 않을 경우 블레이드 손상으로 인한 출력손실을 방지하는 것은 불가피하다.

반면 추운 지역에서 운전되는 풍력터빈은 오염 및 마모현상뿐만 아니라 블레이드 앞전에서 얼음이 증착되는 결빙현상이 추가적으로 발생할 가능성이 있다. 결빙은 과냉각된 물방울, 풍속, 습도, 온도 등의 기후적 영향으로 나타나는 현상으로 블레이드 전연 부 결빙에 의한 풍력터빈의 출력저하 및 불규칙한 하중 변동성을 유발시킨다. Matther Carl Homola(2005) 등은[7-9] 1998년부터 2004년 동안 발생한 풍력터빈 결빙 사례 조사를 통해 결빙으로 인한 출력성능 저하 및 실속지연 현상으로 인한 과부하, Mass Imbalance에 의한 풍력터빈 주요부품의 피로수명 단축 등의

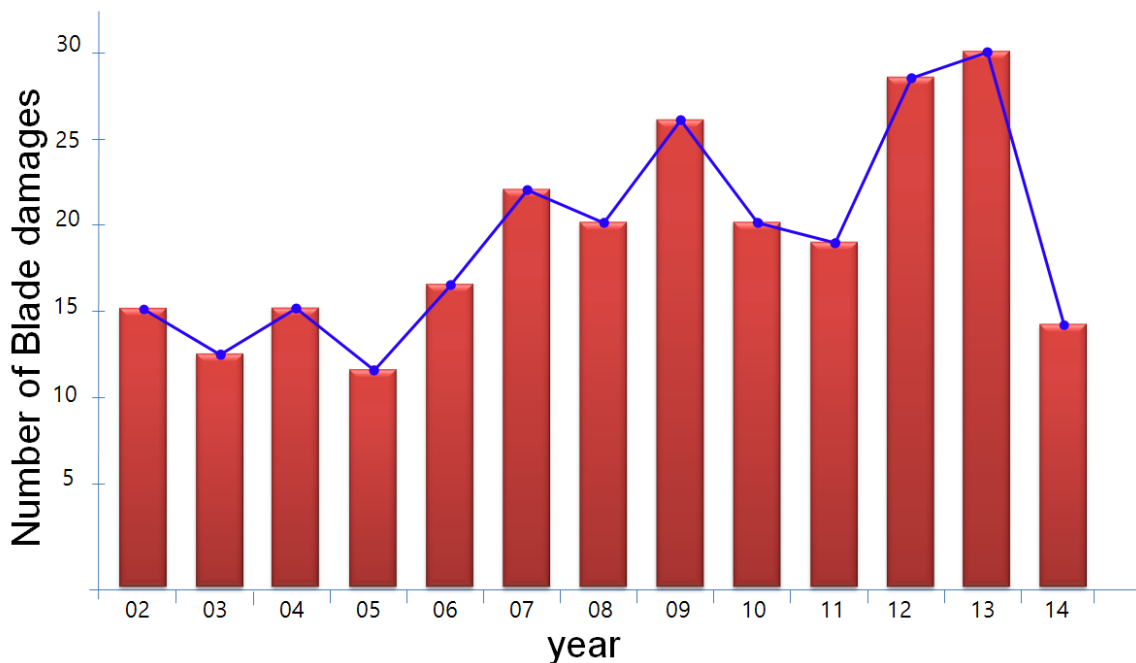


Fig. 1-2 Number of recorded accident of blade damages from 2002 - 2014

문제점들을 제시하였다. 또한 블레이드 표면 결빙이 장기간 지속될 경우, 결빙과편이 지상으로 떨어지는 Ice shedding 현상과 및 발전기 토크감속으로 인한 풍력터빈의 가동중단 사태 등의 문제가 발생하게 된다. 실제로 스웨덴에서 (1998.01~2002.12) 국책사업으로 조사된 622기의 풍력터빈 사건사례 (event)에 관한 통계데이터에 따르면, 1337건의 풍력터빈 가동중단 사례 중 92건(7%)이 결빙에 의해 발생되었으며, 총 가동중단 시간이 8022 Hour 이른다고 확인되었다.

Figure 1-2는 Caithness wind farm information forum에서 제시한 연도별(2002 ~ 2014) 풍력터빈 블레이드 손상 현황으로, 해마다 블레이드 손상이 지속적으로 증가하는 추세를 보이는 것을 확인할 수 있다.[10] 따라서 오늘날 풍력산업에 종사하는 다수의 연구자들은 블레이드 손상이 풍력터빈에 미치는 영향성을 면밀히 분석하기 위해 관련 연구를 활발히 진행하고 있다.

1.2 연구목적

블레이드 전연 부 손상상태 변화에 따른 풍력터빈 출력과 하중에 미치는 영향에 관한 정량적인 데이터를 확보하기 위해 실험적 방법 또는 수치해석방법을 이용한 관련 연구사례가 지속적으로 보도되고 있다.

수치해석방법을 이용한 관련연구는 Jianxin Ren(2009)등에 의해 수행되어졌다. 이들은 표면오염물 증착 높이 및 면적 변화가 에어포일 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 상대두께가 30%인 NACA63430 에어포일 이용하여 특정받음각 10.6°조건에서의 CFD 유동해석을 수행하였고, Critical roughness area와 height 조건을 제시하였다.[11] 하지만 이들의 연구결과는 매우 제한된 받음각 조건에서 수행되므로 받음각 변화에 따른 공력성능 변화율에 관한 상관관계를 도출할 수 없는 문제점이 있었으며, 오염에 의해 발생하는 풍력터빈 AEP(Annual Energy Production) 손실 및 하중 변화율을 예측하기 위해서는 보다 광범위한 받음각 조건에서의 공력성능 데이터 확보가 필요하다.

실험적 방법으로는 Agrim Sareen(2014) 등과[12] Clement Hochrt(2008)[13] 등이 풍동실험을 이용한 연구사례가 있다. Agrim Sareen(2014) 등은 블레이드 표면에서 발생하는 마모상태를 Pits, Gauges, Delamination으로 구분하여 Reynolds 수 100만, 150만, 180만인 조건에서의 DU96-W-180 에어포일의 공력성능 변화율을 제시하였다. Clement Hochrt 등은 Vestas 1.8MW 풍력터빈 블레이드를 구성하는 NACA-63

415 에어포일을 이용한 결빙실험을 통해 풍속 11.8m/s, 23.3m/s, 35m/s 조건에서의 착빙된 에어포일 형상과 mass 증가량, 공력성능 변화율을 제시하였다. 대형 풍력터빈 블레이드에서 발생하는 손상은 대부분 상대적으로 큰 Angular Velocity에 노출되는 팁 영역에서 가속화되어 발생되며 정격풍속 조건에서 Reynolds 수가 약 600만에 이르게 된다. 이들 모두가 제시한 결과는 상대적으로 낮은 Reynolds 수 유동조건을 적용한 연구결과로, High Reynolds 수 유동조건에서 운전되는 오늘날의 대형 풍력터빈을 대표할 수 없는 문제점을 지닌다.

따라서 본 연구에서는 Transient CFD 해석과 통합하중해석을 통해, 다양한 손상 조건에 노출된 블레이드 팁 에어포일의 공력성능변화가 대형 풍력터빈의 AEP 손실에 미치는 영향에 대한 정량적인 결과를 제시하고자 한다.

II. 에어포일의 공기역학적 특성 및 결빙 이론

2.1 유동박리에 의한 실속현상[14]

에어포일의 표면을 따라 흐르는 유동의 속도증감은 흡입면과 압력면의 압력차를 유발시키며, 이는 유동에 수직방향으로 작용하는 양력을 발생시킨다. 이상과 같은 양력은 식 (1)과 같이 유체의 밀도(ρ), 유속(V), 형상의 크기(A) 및 힘(F_D)으로 정의되며, 양력의 특성은 무차원수인 양력계수로 표현이 가능하다.

$$C_L = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{식(2-1)}$$

양력계수는 흡입면과 압력면의 압력차(Δp)가 증가할수록 커지며, 최대점에 도달할 때까지 선형적으로 증가한다. 하지만 특정 받음각 이상에 도달할 경우, 유체의 흐름이 에어포일 표면으로부터 이탈되는 유동박리 영역이 형성되어 양력이 급격하게 감소하는 실속현상이 발생한다. 유동박리에 의한 실속현상은 층류-천이-난류 영역이 모두 공존하는 에어포일의 표면 압력구배 변화에 따른 경계층 유동특성과 밀접한 관련이 있다.

Figure 2-1에 에어포일 흡입면 경계층 내의 속도분포를 나타내었다. V_1 은 경계층 내의 표면마찰로 인한 유속 감속을 극복할 수 있는 순압력구배(favorable pressure gradient) 상태를 나타낸 것으로 자유유동 속도가 벽면을 따라 증가할 때 발생한다.

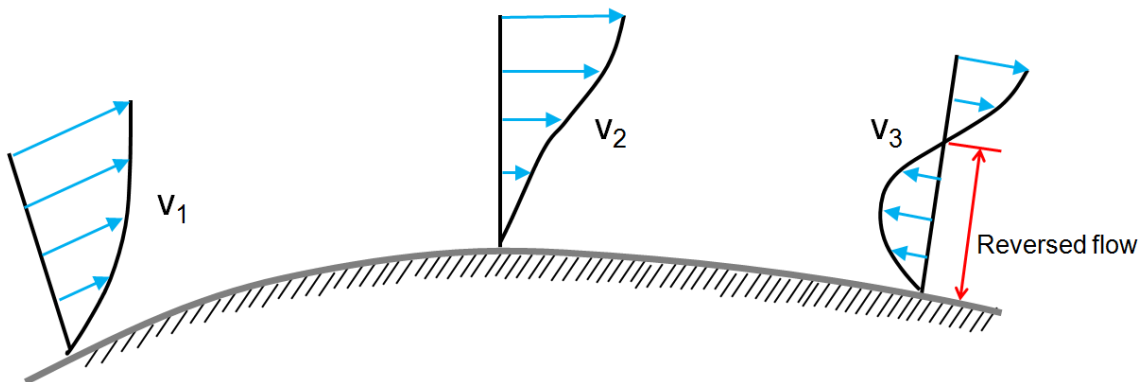


Fig. 2-1 Boundary layer in flow over airfoil surface

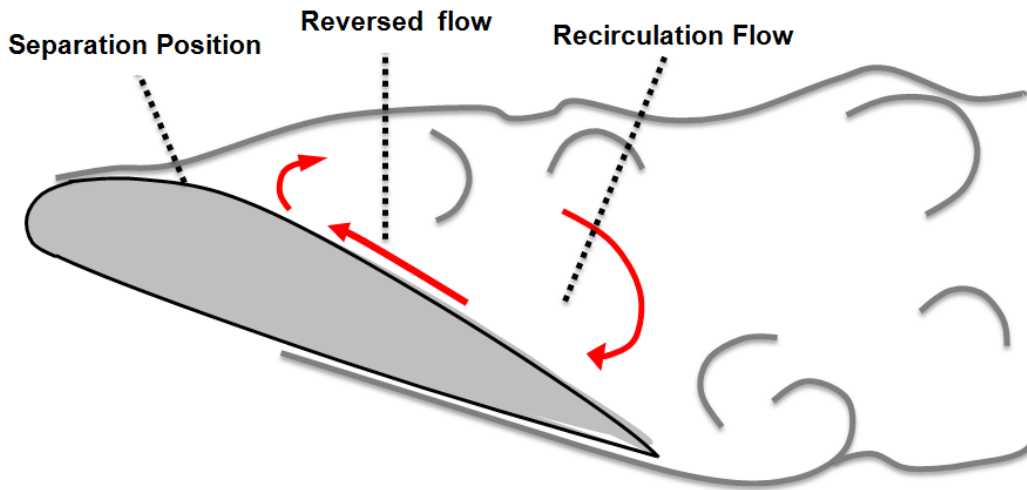


Fig. 2-2 Boundary layer separation and recirculation phenomena

이 후 벽면을 타고 흐르는 유동은 후단으로 갈수록 속도가 감소되어 V_2 상태에 이르게 되는데 이를 임계 역압력구배(박리점)라고 일컫는다. 경계층 내의 속도가 0이 되는 V_3 상태에 도달할 경우에는 압력 차이에 의해 역류(Reversed flow)가 발생하는 역 압력구배(adverse pressure gradient)가 발생한다. 이상과 같은 역류는 압력과 속도 변동성이 큰 High Angle of attack 조건에서 더욱 빨리 생성된다. 또한, 특정 받음각 이상구간에서는 Figure 2-2와 같이 역류와 경계층외부유동 간의 활발한 혼합작용으로 인한 순환영역(Recirculation flow)이 생성되어 양력을 급격하게 감소시키는 실속 현상이 발생한다.

즉, 실속현상은 에어포일 표면 마찰에 의해 발생하는 역류현상으로부터 시작되며, 오염, 마모, 결빙현상으로 표면 조도가 더욱 거친 블레이드의 경우, 매끈한 블레이드에 비해 실속 현상이 조기에 발생될 것으로 판단된다.

2.2 Reynolds 수와 항력계수의 상관관계[15]

항력은 물체의 벽면 전단응력(τ_w)에 의하여 발생하는 표면마찰항력과 압력 P에 의하여 발생하는 압력항력(또는 형상압력)으로 구분된다. 이와 같은 항력은 다음의

$$C_{D, fraction} = \frac{F_{D, fraction}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad , \quad C_{D, pressure} = \frac{F_{D, pressure}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{식(2-2)}$$

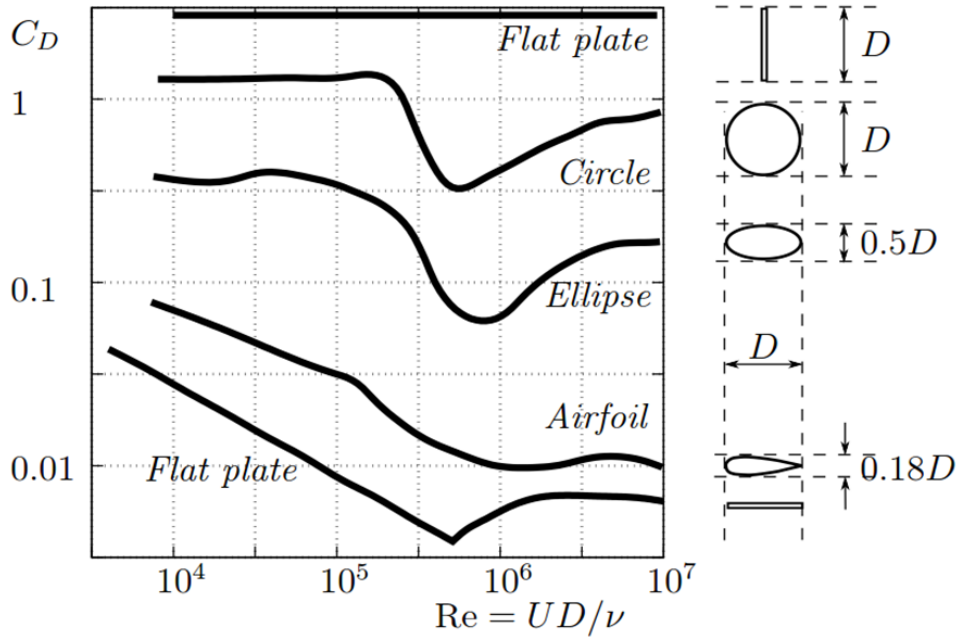


Fig. 2-3 Drag characteristic of Various bodies[16]

식 (2-1)로 정의되며 이를 무차원화 하여 표현한 것을 항력계수라 한다. 표면마찰항력은 유체의 점성과 밀접한 관계가 있으며, 유체의 점성이 커질수록 증가한다. 특히 유체의 점성은 Reynolds 수와 역비례 관계이며 경계층 유동에서의 마찰계수 변화에 따라 총 합력에서 차지하는 표면마찰항력의 비율이 결정된다. 압력항력은 물체의 정면도 면적에 비례하며, 에어포일과 같은 유선형 물체에서는 전연과 후연의 압력차 크기에 따라 압력항력이 결정된다. 또한, Reynolds 수와 형상에 따라 압력항력의 특성이 변화한다.

Figure 2-3에 Reynolds 수 10,000 ~ 10,000,000인 유동 조건에서 형상에 따라 변화하는 항력의 특성을 나타내었다. 유동의 방향과 수직인 평판은 Reynolds 수에 상관없이 일정한 항력을 유지하고 있으나, 이를 제외한 나머지 형상의 항력은 불규칙한 변동성을 나타낸다. 특히 에어포일은 천이에서 난류로 변화되는 Reynolds 수 100만 이하의 영역까지 항력이 감소하게 되는데, 이는 Reynolds 수가 증가 할수록 유체의 점성이 감소하여 나타는 현상이다. 이 후 완전 난류상태의 유동조건에서 에어포일의 항력은 서서히 증가하다 감소하는 불규칙한 변화를 보인다. 이상과 같은 현상은 완전 난류상태의 유동이 에어포일의 정체 점에 매우 근접한 영역까지 도달하여 나타나는 결과이다.

2.3 결빙 성장률(rate of ice growth)

결빙의 성장률은 다음의 식(2-1)과 같이 정의된다.[17]

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * w * v * A \quad \text{식(2-3)}$$

A는 결빙이 발생하는 물체의 단면을 v 는 입자의 상대속도를 w 는 단위체적 당 포함되는 입자의 질량을 의미한다. α 는 물체에 충돌되는 액적과 표면에 부착되는 결빙의 효율을 나타내는 것으로 α_1 는 충돌효율(Collection efficiency)을, α_2 는 응집 효율(Coalescence efficiency)을 α_3 은 착빙효율(Accretion efficiency)을 의미한다.

여기서 α 에 직접적인 영향을 미치는 인자는 Droplet size와 물체의 형상 크기로 α 값들이 높을수록 결빙성장률은 증가한다.

Figure 2-4에 Droplet size에 따라 물체에 충돌되는 액적의 특성을 나타내었다. Small Droplet은 Large droplet에 비해 상대적으로 관성력이 작아 물체를 지날 시 기류(airflow)를 따라 함께 이동함으로 충돌효율이 낮다. 충돌효율은 형상에 크기에 따라 영향을 받게 되는데, 일반적으로 형상이 큰 물체 보다 형상이 작은 물체의 충돌효율이 더욱 높다. 이는 형상이 작을수록 벽면을 타고 흐르는 유동과 주변 유동 간의 간격이 좁아지기 때문에 발생하는 현상이다.

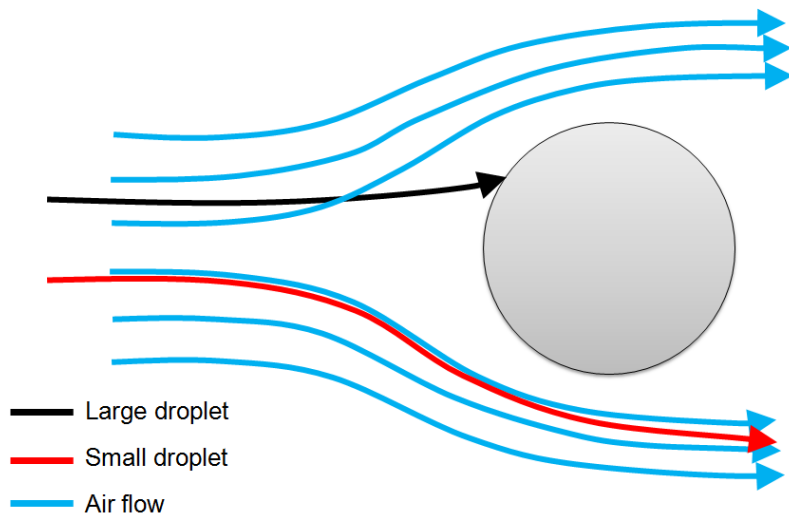


Fig. 2-4 Air streamlines droplet around a cylindrical object

2.4 Collection efficiency의 특징

충돌효율은 결빙형태를 결정하는 주요인자로, 에어포일의 상대두께와 받음각에 따라 그 특성이 달라진다. 통상 블레이드는 풍력터빈의 구조안전성, 출력성능 등이 고려되어 Root로부터 Tip 영역에 도달할수록 에어포일의 상대두께가 얇아지도록 설계되며, 풍속조건에 따라 에어포일의 받음각이 가변적임으로 충돌효율 특성에 직접적인 영향을 준다.

Thomas F. Gelder 등은(1956) 풍동실험을 통해 다음과 같이 β (Local Collection efficiency)의 특성과 에어포일의 상대두께 및 받음각의 상관관계를 도출하였다.[18]

① 받음각

Figure 2-5는 이들이 제시한 연구결과로, Joukowski 0015 에어포일의 받음각 변화에 따른 β_{\max} 와 충돌한계점을 제시하였다. 받음각 0° , 4° , 8° 에서 측정된 β_{\max} 값과 충돌한계점의 위치가 달라지는 것을 확인할 수 있다. Suction side의 충돌 한계점은 받음각이 낮은 0° 조건에서 가장 크게 나타나는 반면, Pressure side의 충돌한계점은 8° 조건에서 가장 크게 나타낸다는 결과를 제시하였다. 또한 β_{\max} 는 받음각이 증가할수록 선형적으로 감소하며, 정체 점 부근과 전연 부 사이에 β_{\max} 가 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 받음각 변화에 따른 Collection efficiency 특성 변화를 이해할 수 있다.

② 상대두께

동일한 NACA계열 중 상대두께 비가 다른 NACA 65-206과 NACA 65-212 에어포일의 결빙형상을 통해 β 와 두께 비의 상관관계를 분석하였다.

Figure 2-6는 받음각 0° 조건에서 확보된 β_{\max} 와 충돌한계점으로, 상대두께 비가 감소할수록 β_{\max} 와 충돌한계점이 증가하며, Total Collection efficiency가 더욱 높게 측정되었다. 상대두께 비가 두꺼운 NACA65-212 에어포일의 β 는 정체 점 근방을 제외한 나머지 영역에서 전반적으로 높게 예측되는 특징을 보였다.

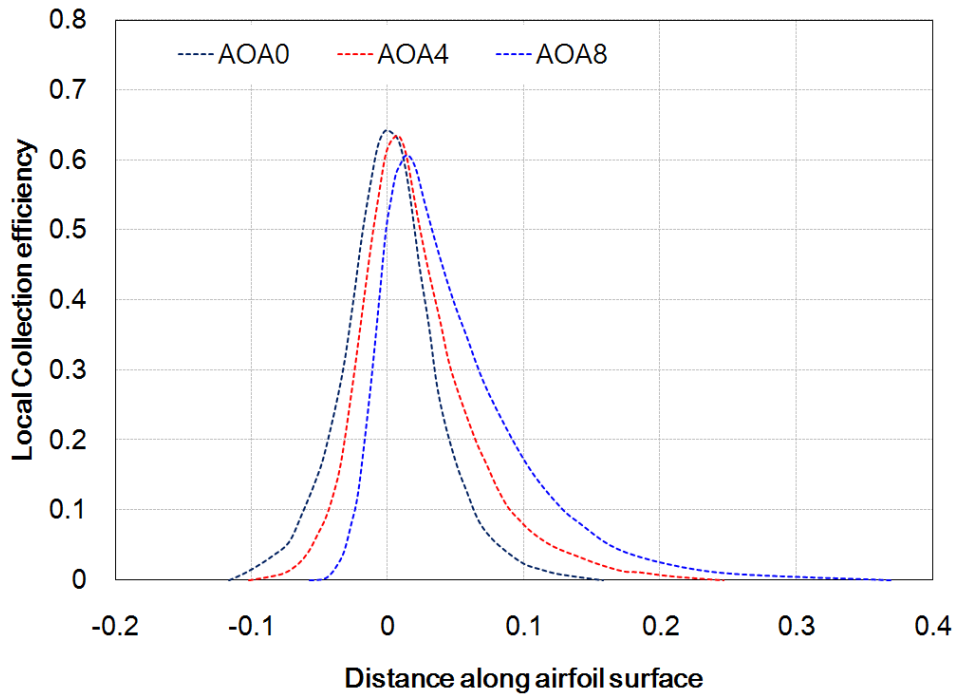


Fig. 2-5 Effect of airfoil angle of attack on local collection efficiency

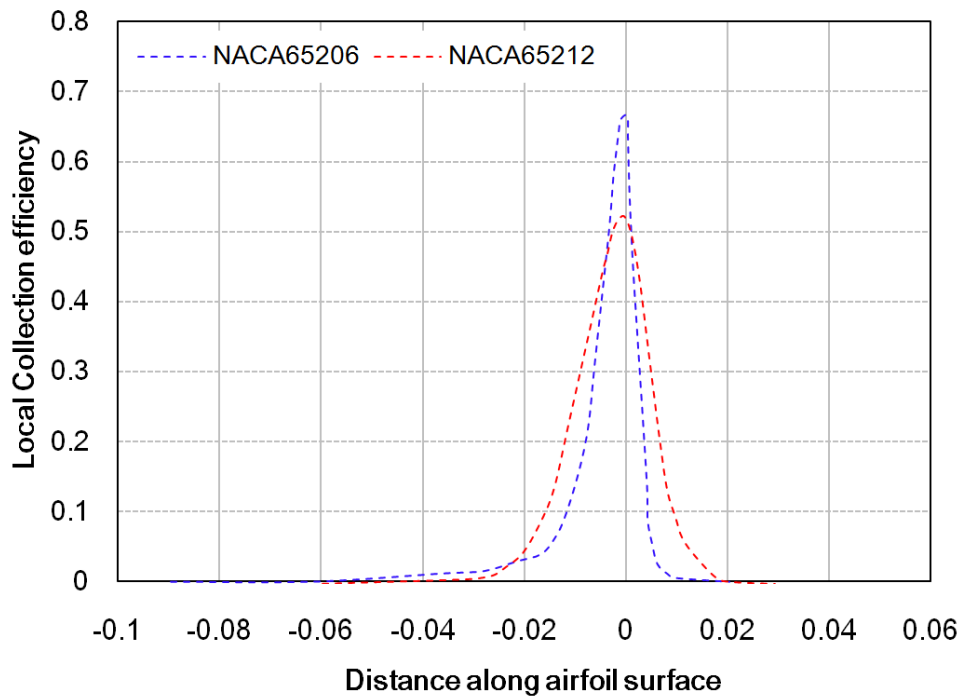


Fig. 2-6 Effect of airfoil Thickness on local collection efficiency

III. 시뮬레이션 모델 및 블레이드 손상상태 정의

3.1 시뮬레이션 모델 선정

3.1.1 에어포일 모델 선정

풍력터빈 블레이드 설계과정에서는 출력성능, 구조안정성, 운전조건 등을 고려하여 반경방향 거리변화에 따른 에어포일의 형식과 두께분포를 결정하며, 특히 블레이드의 tip 영역은 고 풍속 조건에서 운전되기 때문에 상대적으로 우수한 공력성능을 갖는 얇은 에어포일을 배치하여 풍력터빈의 출력성능을 극대화 시킨다.

그러나 tip 영역은 앞서 2장에서 전술한 바와 같이, 표면 오염, 마모, 결빙 등의 손상이 가장 가속화되어 발생하는 영역임으로 풍력터빈의 구조안정성 및 효율의 악영향을 끼칠 것으로 판단되다. 본 연구에서는 tip 에어포일 손상이 풍력터빈에 미치는 영향성을 분석하기위해 오늘날 대형풍력터빈에 주로 사용되는 tip 에어포일을 조사하여 CFD 해석모델로 선정하였다.

풍력터빈 블레이드에 사용되는 대표적인 에어포일은 Delft 공대에서 개발한 DU계열과, NREL(National Renewable Energy Laboratory)의 S-series, NASA의 NACA 계열 등이 있다. 이 중 상대적으로 양력특성이 우수한 tip에어포일은 NACA계열로 알려져 있으며 NACA63-series, NACA64-series 등이 존재한다.

W.A Timmer 등은[19] 풍동시험을 통해 공력성능이 우수하다고 알려진 NACA64-018, NACA64-218, NACA64-418, NACA64-618 에어포일의 공력성능데이터를 제시하였다.

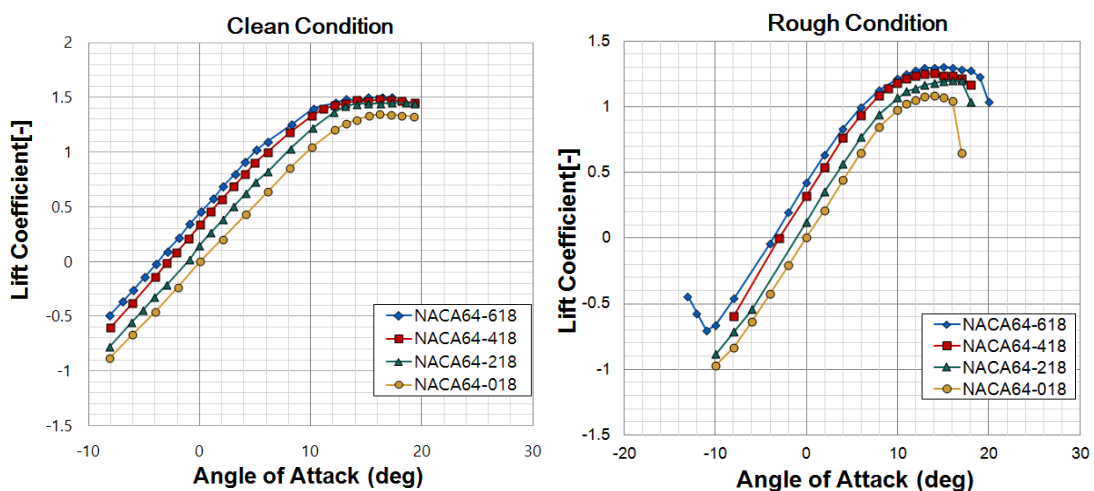


Fig. 3-1 Lift coefficient of NACA64-series airfoil under clean and rough condition

이 때 Rough 조건 분석 시 적용된 오염 조건은 NACA standard roughness(no.60 grid) 연마제를 에어포일 전연의 8% 면적에 부착하여 모사하였으며, 유동조건은 Reynolds 600만에 해당한다. Figure 3-1은 이들이 제시한 NACA64계열의 표면상태 (Clean, Rough) 변화에 따른 양력계수로, NACA64-618에어포일이 다른 에어포일과 비교했을 때 모든 받음각 구간에서 가장 우수한 성능을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 NACA64-618 에어포일을 해석 모델로 선정하였다.

3.1.2 풍력터빈 모델 선정

블레이드 에어포일의 오염 및 마모 상태 변화에 따른 공력성능변화가 풍력터빈의 AEP 손실에 미치는 영향을 분석하기 위해서 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 연구용으로 제공하는 5MW 풍력터빈의 설계 정보를 사용하였다. [20] Figure 3-2와 같이 NREL 5MW 블레이드의 Root와 Mid($r/R < 70\%$)영역은 구조강도가 우수한 DU계열로 구성되며 Tip($r/R > 70\%$)영역은 공력성능이 우수한 NACA64618에어포일로 구성된다.

NREL-5MW 풍력터빈의 정격풍속과 정격회전속도는 각각 11.4m/s와 12.1rpm이며, 로터직경은 126m, 허브높이는 90m 이다. Structural steel 재질의 타워 하부직경은 6m, 두께는 0.027m 이며, 상부 직경 및 두께는 각각 3.87m와 0.016m로서, 상부로 올라갈수록 두께가 얇아지는 tubular 타입으로 설계되었다. 정격풍속 이전의 구간에서 출력성능을 극대화 하기위해 variable speed control을 실시하며, 정격풍속 이상의 구간에서는 안정적인 출력제어를 위해 variable blade pitch control을 적용한다.

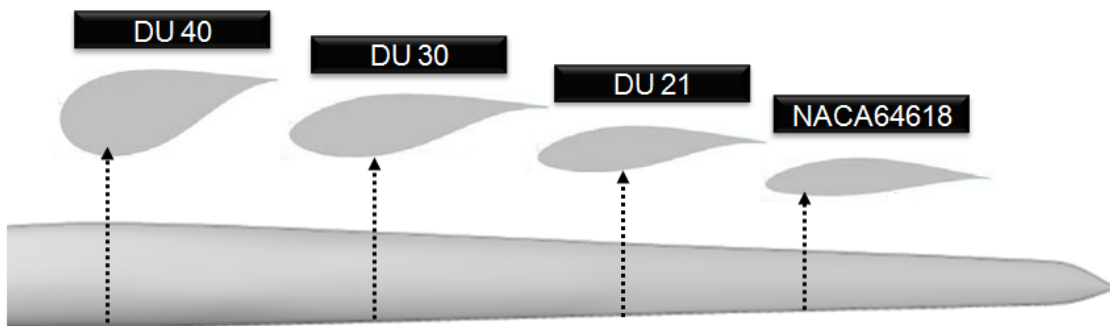


Fig. 3-2 NREL 5MW wind turbine blades composed of various airfoils

3.2 블레이드 손상상태 정의

3.2.1 블레이드 오염현상

① 오염현상의 특징

건조한 사막지역에서 발생하는 오염은 바람과 함께 유입되는 흙먼지나 작은 모래 알갱이들이 블레이드 표면에 부착되는 현상으로써, 블레이드 반경에 따라 증가되는 각속도의 영향으로 블레이드 Tip 영역에 근접할수록 오염되는 양이 선형적으로 증가한다. 바람이 유입되는 블레이드 전연의 정체 점 근방에서 오염물이 가장 심각하게 쌓이는 것이 특징이며 다우지역과 같이 비가 자주내리는 곳은 블레이드 표면에 쌓인 오염물들이 빗물에 의해 자동적으로 세척되기 때문에, 오염현상으로부터의 영향을 거의 받지 않는다.

insect에 의한 오염은 곤충이 활동할 수 있는 저 풍속영역에서 주로 발생하며, 곤충이 번식하기 쉬운 환경조건인 10°C 이상의 온도와 낮은 습도가 유지되는 환경에서 더욱 심각하게 나타난다. 이상과 같이 블레이드 표면오염은 풍력터빈이 설치된 외부환경조건에 따라 오염 수준이 결정되는 특징을 보인다.

② 시뮬레이션을 위한 오염상태 정의

먼지, 모래, 곤충 등에 의해 발생하는 오염물 증착은 블레이드 표면거칠기를 증가시키는 원인이 되며 오염상태에 따라 공력성능에 미치는 영향이 결정된다. 일반적으로 surface roughness height와 area가 클수록 공력성능 감소율 크지만, 두 변수의 관계가 항상 선형적으로 비례한다고 볼 수는 없다.

Table 3-1 Definition of contamination conditions

Case	Roughness area[%]	Roughness height[mm]
1	10	0.1
2	30	
3	50	
4	10	0.2
5	30	
6	50	
7	10	0.3
8	30	
9	50	

Jianxin Ren(2009) 등은 Roughness height가 0.3mm이상이면서 Roughness area가 $x/c > 50\%$ 이상인 조건의 경우, 에어포일 벽면에 완전한 난류경계층이 형성됨에 따라 공력성능 감소율이 오히려 줄어들어준다고 보고하였다.

Khalfallah와 Koliub는 사막지역에서 3개월 동안 유지보수가 이루어지지 않은 블레이드 전연 부에서 측정된 Roughness height가 chelo 0.26 ~ 0.3mm 수준으로 변화된다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 Table 2-1에 나타난 바와 같이, 오염조건 정의를 위해 Roughness height와 Roughness area(x/c)를 각각 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm와 10%, 30%, 50%로 결정하였다.

3.2.2 블레이드 마모현상

① 마모현상의 특징

블레이드 표면에서 발생하는 마모는 Pits, Gouges, Delamination 단계로 구분된다. 초기단계로는 불규칙한 균집분포를 갖는 작은 pits 들이 정체 점 근방의 압력면에서 발생되며, 시간이 지남에 따라 pits 간의 결합에 의해 gouges 형태로 발전하게 된다. 이상의 현상이 지속될 경우, 블레이드 표면의 Coating 재료가 완전히 마모되어 Shell laminate가 노출되며 심각할 경우, 블레이드 전연 부의 접합부가 갈라지는 Delamination 현상이 발생되어 구조안전성에 심각한 영향을 미치게 된다.

마모현상이 발생하는 영역은 상대풍속 크기가 큰 Tip($r/R > 70\%$) 부근에서 주로 확인되며 흡입면에 비해 압력면에서 마모현상이 더욱 활발히 발생된다. 또한 전연 부 근방에서 높은 밀도분포를 보이며 반면, Chord wise 방향으로 갈수록 감소하는 특징을 나타낸다.

② CFD 시뮬레이션을 위한 마모상태 정의

CFD 시뮬레이션을 위한 마모조건을 정의하기 위해 유지보수 없이 약 12년 동안 운전된 Vestas V47 블레이드의 전연 부 마모상태를 관찰하였다.

Table 3-2 Definition of erosion conditions

Case	State	Depth[mm]	Width[mm]
10	Light	3.4	10
11	Moderate	3.6	17.4
12	Heavy	4.8	37

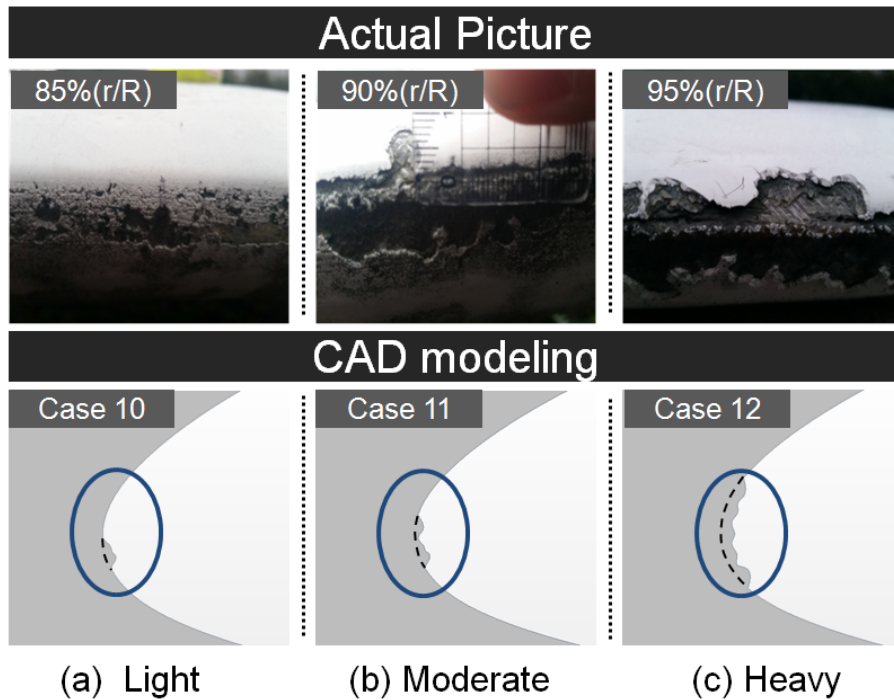


Fig. 3-3 Erosion conditions at the leading edge of a Vestas V 47 blade

마모는 블레이드 Root 와 Mid section을 제외한 tip영역에서만 마모가 확인되었으며, 블레이드 반경방향으로 거리가 85% 이하인 구간에서 Pits 형태의 마모가 압력면에서만 발생되었다. 90% 구간에서는 pits와 gouges 형태가 흡입면까지 확대되었으며 95% 구간에서는 심각한 수준의 Delamination 상태에 이르고 있다. 관찰된 마모현상은 정체 점 근방의 압력면으로부터 시작되어 흡입면으로 점차 확대되며, tip 영역에 근접할수록 마모의 깊이와 폭이 증가하는 특징을 보였다. 따라서 본 연구에서는 전연 부 마모상태를 Light, Moderate, Heavy 조건으로 분류하였고, 블레이드 반경 85%, 90%, 95% 단면에서 관찰된 마모상태를 참조하여 마모 깊이와 마모 폭을 결정하였다. 각각의 단면에서 측정된 마모 깊이와 마모 폭은 Table. 2-2에 나타냈으며, Vestas V47 블레이드에서 관찰된 마모상태와 CFD 모델형상(에어포일)은 Figure 3-3에 제시하였다.

3.2.3 블레이드 결빙현상

① 결빙현상의 특징

결빙현상에 직접적인 영향을 주는 인자는 외부공기온도, MVD(Mean Volume Diameter), LWC(Liquid Water Content), 고도가 있으며 그 외에 풍속, 결빙지속시간

등에 따라 결빙의 형태와 결빙 성장률(ice growth)이 결정된다. ISO-12494 규정에 따르면 결빙의 형태는 Figure 3-4와 같이 Glaze ice와 Rime ice로 구분되며 풍속 및 온도에 따라 Rime ice는 Soft ice로 분류된다.

[Glaze Ice]

외부공기온도가 0° 가까운 외부환경조건에서 Freezing Rain에 의해 발생하는 결빙형태를 말한다. 일반적으로 Glaze ice가 발생하는 물체의 표면은 빙점에 근접하기 때문에, 유선을 따라 흐르는 과정에서 결빙이 발생되며 중력과 바람의 영향으로 불규칙하게 결빙이 형성되는 것이 특징이다.

[Rime Ice]

액적이 물체표면에 충돌과 동시에 발생하는 결빙형태로, 영하 이하의 추운 외부 환경에서 주로 발생한다. Rime ice는 온도에 따라 크게 Soft ice와 Hard rime으로 분류되며 물체기존의 형상을 따르며 얼음이 증착되는 것이 특징이다.

Soft Rime은 LWC와 Water Density가 Hard Rime에 비해 상대적으로 낮으며 Droplet size가 작은 외부환경조건에서 발생된다. 반면, Hard Rime은 Droplet size와 LWC, Water density 모두가 Soft Rime에 비해 높은 조건에서 형성되며 얼음입자 간의 결속이 우수하여 Soft Rime에 비해 더욱 단단하다.



Fig. 3-4 Ice form at the leading edge of airfoil (left : rime ice, Right : glaze ice) [21]

② 결빙시물레이션을 위한 외부환경조건 및 해석 Case 선정

결빙현상은 다양한 인자에 의해 그 형태와 Ice growth rate이 결정되기 때문에 풍력터빈에서 주로 발생하는 외부환경조건을 명확하게 정의해주는 것이 중요하다.

2.3.1에서 전술한 바와 같이, 결빙형태는 크게 Rime ice와 Glaze ice로 구분되는데, 풍력터빈과 같은 회전하는 물체에서는 Rime ice가 주로 발생된다. 따라서 본 연구에서는 Rime ice가 형성될 수 있도록 외부공기온도를 -8° , LWC를 $0.22g/m^3$ 으로 설정하였다.

풍속은 식.1에서 나타낸 바와 같이 결빙성장률에 직접적인 영향을 미치는 주요 인자로써, 시물레이션 모델인 NREL 5MW reference 풍력터빈의 정격풍속 11.4m/s 조건과 정격회전속도 12.1 RPM조건에서 발생하는 상대풍속을 적용하였다.

Homola 등은 결빙시물레이션을 이용하여 Droplet size($12\mu m$, $17\mu m$, $30\mu m$) 변화에 따른 NACA64618 에어포일의 공력성능 분석을 통해, Droplet size가 $17\mu m$ 이상의 조건에서 공력성능이 감소율이 동일한 폭으로 감소된다는 결과를 제시하였다. [22] 이들이 제시한 연구결과를 참고하여 본 연구에서는 Droplet size를 $25\mu m$ 로 설정하였다. 결빙 시물레이션에 적용된 Ice condition에 관한 상세 정보는 Table 3-3에 정리하여 나타내었다.

Muhammad S. Virk등은 NREL에서 설계된 에어포일의 형상데이터 및 상대풍속을 참조하여, 블레이드 Root부터 Tip 영역으로 갈수록 증가하는 상대풍속과 에어포일 두께가 얇아지는 Geometry의 특성을 반영한 결빙시물레이션을 수행하였다. [23] 블레이드 각각의 단면에 위치한 에어포일 전연 부의 결빙형상과 mass 증가량을 확보하였으며, Tip영역에서 발생된 mass 증가량이 전체 결빙의 약 70% 이상을 차지한다는 결과를 제시하였다

Table 3-3 Definition of CFD simulation condition for icing

Parameter	Value	Unit
Wind speed	11.4	<i>m/s</i>
Rotor rotation speed	12.1	<i>RPM</i>
Temperature	-8	$^{\circ}C$
Droplet Size	25	μm
Liquid Water Content	0.22	g/m^3
Simulation time	60	min

따라서 본 연구에서는 결빙이 가장 활발히 발생하는 블레이드 tip영역인 반경 70%, 77%, 83%, 89%, 97%을 계산단면으로 설정하였으며, 이에 해당하는 상대풍속과 Chord length에 관한 상세 정보는 Table 3-4에 나타내었다.

Table 3-4 Chord length and Relative velocity for Simulation Case

Section	r/R [%]	Chord length [m]	Relative Velocity [m/s]
A	70	3.01	57.6
B	77	2.764	62.7
C	83	2.518	67.82
D	89	2.313	72.1
E	97	1.419	80.6

IV. 팁 에어포일 전연 부 손상상태에 따른 공력성능 분석

4.1 수치해석 조건 선정

4.1.1 난류모델 선정

오늘날 상용 CFD 코드는 실제 복잡한 유동현상들을 수치해석 방법으로 모사하기 위해 RANS 방정식을 기초로 한 다양한 모델들을 개발해 왔다. 대표적인 RANS 모델로는 eddy-viscosity 모델과 Reynolds-stress 모델로 크게 구분되며 에어포일 혹은 블레이드의 성능 분석 시 주로 사용되는 모델은 eddy-viscosity 모델에 포함된 $k-\omega$ 계열과, $k-\epsilon$ 계열의 모델이 있다.

$k-\epsilon$ 계열 중 realizable $k-\epsilon$ 모델은 대부분의 engineering Simulation에 가장 많이 사용되고 있으며, Free stream 영역의 유동에 대한 예측 정확도가 우수하나, 경계층 내부에 역 압력구배가 존재하는 경우에는 난류전단응력을 과대 예측하기 때문에 에어포일 등과 같이 곡률을 갖는 벽면에서의 박리현상을 지연 시키는 문제점이 있는 것으로 알려져 있다. 반면 Wilcox에 의해 제안된 Standard $k-\omega$ 모델은 벽면 근처에서 발생하는 유동박리 지점 및 와류의 크기를 비교적 정확하게 예측할 수 있으나, Free stream 영역에 대해 민감한 결과를 나타낸다.

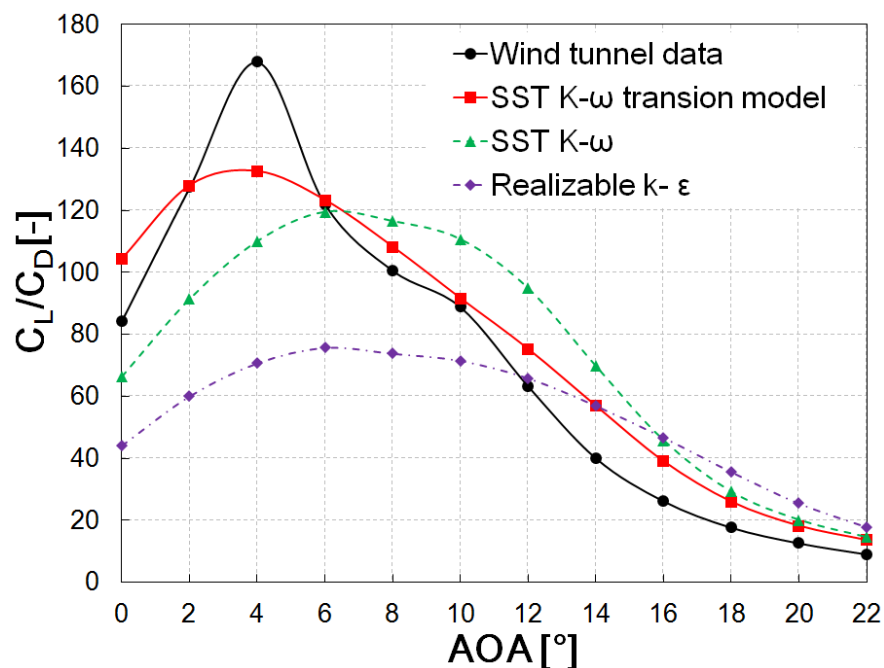


Fig. 4-1 Lift - Drag ratios in various turbulence models

Realizable $k-\varepsilon$ 모델과 Standard $k-\omega$ 모델은 유동장을 완전한 난류상태로 가정하기 때문에 Laminar - Transition - Turbulent 영역이 동시에 존재하는 에어포일 전연 부 근방의 경계층 유동을 정확히 모사 할 수 없다. 이를 보완하기 위해 CFD에서는 자동 벽 처리법(automatic wall treatment)으로 확장이 가능한 SST $k-\omega$ Transition 모델을 지원하고 있다. 이 모델은 $k-\varepsilon$ 와 $k-\omega$ 모델의 장점만을 부합시킨 Transitional turbulence 모델로, 에어포일의 경계층유동을 보다 정확하게 모사할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Turbulence model dependency test를 수행하여, 가장 신뢰성 있는 난류모델을 선정하였다. 이 때 난류모델의 특성에 따라 권장되는 y^+ 에 만족할 수 있도록 Realizable $k-\varepsilon$ 모델은 $30 < y^+$, $k-\omega$ 계열은 $y^+ < 1$ 로 설정하였다.

Figure 4-1에 난류모델 변화에 따른 Simulation 결과와 IRA H. ABBOTT 등에 의해 수행된 풍동시험[24] 결과를 비교하여 나타내었다. 받음각 4° 구간에서 양항비의 차이가 존재하나 대부분의 받음각 조건에서 SST $k-\omega$ Transition 난류모델이 풍동시험 결과와 가장 유사한 경향을 보인다. 반면 Fully Turbulence model들은 항력을 과소 예측하여 양·항비 오차율이 매우 높게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 오염, 마모, 결빙 조건에 관한 유동해석 수행 시 SST $k-\omega$ Transition 모델을 적용하였다.

4.1.2 격자

유동해석 수행 시, 신뢰성 있는 해석결과를 확보하기 위해서는 적합한 mesh nodes, 우수한 품질의 격자, 격자 밀집분포의 적정성 등이 반드시 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 격자 의존성 test를 통해 최적의 mesh nodes를 선정하였으며, STAR-CCM+에서 요구하는 격자품질 측정항목인 Face Validity 0.5이상, Volume change metric $1.0e-5$ 이상, skewness angle 90° 이하에 만족하도록 격자를 생성하였다.[25]

① 오염&마모

ICEM-CFD를 이용하여 에어포일 성능 해석 시 주로 사용되며 해의 수렴성 및 해석 정확도가 우수한 Hexa(structured mesh)로 격자를 생성하였다. 에어포일 벽면

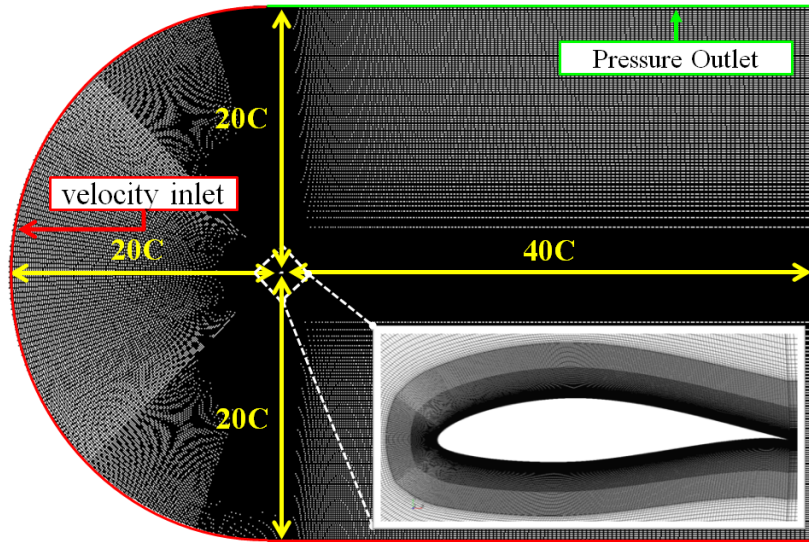


Fig. 4-2 Boundary condition used in the CFD simulation for contamination and erosion

으로부터 수직방향으로의 첫 번째 격자 위치는 적용된 난류모델에 (SST k- ω Transition) 권장 $y^+ < 1$ 를 만족하도록 설정하였으며, 효율적인 격자밀집도 확보를 위해 에어포일 주변에 격자를 조밀하게 생성하였다. 생성된 계산격자는 Figure 4-2에 나타내었다. 격자 의존성 test에 사용되는 격자수는 20만, 25만, 30만개로 격자품질의 차이가 발생되지 않도록 벽면 근처를 제외한 나머지 유동공간의 격자를 재배치하여 격자 수를 조정하였다. 격자품질 검토 결과 Face validity는 1, Volume change metric은 $1.0e-2$, Maximum skewness angle은 33.05° 로 권장되는 기준에 만족하는 것을 확인하였다.

Table 4-1은 $Re=600$ 만의 유입조건에서 받음각 8° 에 대한 격자 의존성 test 결과를 나타내었다. Case 1은 다른 조건들의 해석결과에 비해 오차율이 나타나고 있으나, Case2와 Case3의 해석결과는 오차율이 거의 없기 때문에, 본 연구에서는 격자 수를 25만개로 결정하였다.

Table 4-1 Result of mesh dependency test for contamination and erosion simulation

Case	AOA($^\circ$)	Mesh.No	C_L / C_D
1	8	200000	96.014
2		250000	108.217
3		300000	107.69

② 결빙

물리적 시간 변화에 따른 에어포일의 결빙형상을 예측하기 위해, STAR-CCM+에서는 Morphing motion 기법을 지원하고 있다. Morphing Motion 기법은 얼음이 증착되는 에어포일 주변부 격자를 재배치하여 기존의 형상을 변형시키는 방법으로, 3차원 유동해석이 요구되며 STAR-CCM+에서 제공하는 격자들을 사용하는 것이 필수적이다. 또한 격자 재배치 과정에서 격자품질이 악화되는 문제점을 개선하기 위해 Surface boundary mesh extraction 기능을 이용하여 주기적으로 Re-mesh를 하는 것이 권장된다.[26] 따라서 본 연구에서는 STAR-CCM+에서 제공하는 Trimmer Mesh와 Prism layer를 이용하였으며 각각의 해석 Case 별 최소 15회 이상의 Re-mesh를 수행하였다. 에어포일 벽면 근처를 제외한 나머지 유동영역은 Trimmer mesh로 생성했으며, 난류모델(SST $k-\omega$ Transition)의 특성에 따라 $y+$ 조절이 필요한 에어포일의 벽면 근처는 Prism layer로 생성하였다.

결빙해석을 통해 확보된 3D 에어포일의 결빙 형상은 2D 형상으로 변환하여 공력 성능분석을 수행하였으며 해석 시 사용된 계산격자는 Figure 4-3에 나타내었다. 적합한 격자수 선정을 위해 test용으로 생성된 격자수는 19만, 22만, 25만, 30만개로 동일한 $y+$ 조건을 갖도록 설정하였다. 생성된 격자의 격자품질을 검토한 결과 Face validity는 1, Volume change metric은 $1.0e-1$, Maximum skewness angle은 63.3° 로 권장되는 기준에 만족하는 것을 확인하였다. Table 4-2는 $Re=600$ 의 유입조건에서 받음각 6° 에 관한 격자 의존성 test 결과로, Mesh nodes 19만과 30만 사이의 양·항비 오차율의 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 19만개의 격자설정 값을 기준으로 격자를 생성하였다.

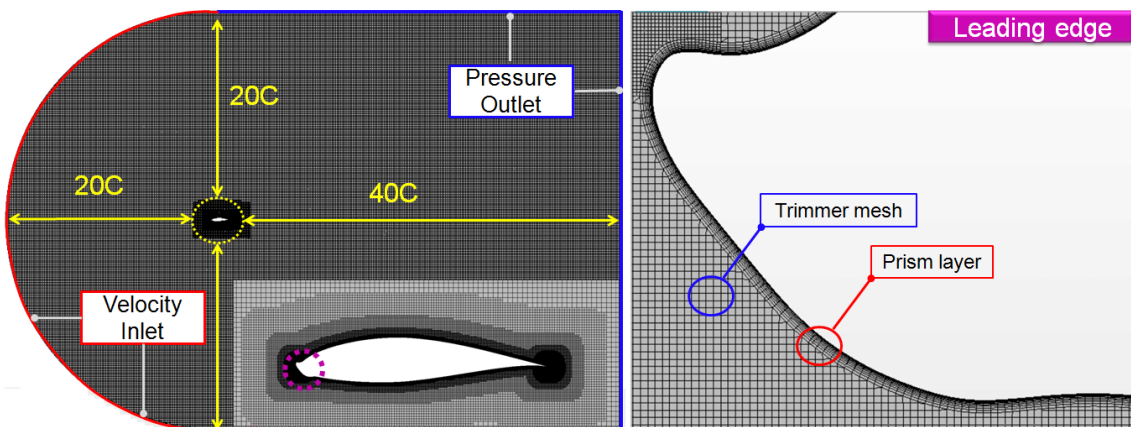


Fig. 4-3 Boundary condition used in the CFD simulation for icing

Table 4-2 Result of mesh dependency test for icing simulation

Case	AOA(°)	Mesh.No	C_L / C_D
1	6	190000	121.09831
2		220000	121.06837
3		250000	120.67307
4		300000	121.2152

4.1.3 경계조건

에어포일 전연에서 집중적으로 발생하는 손상(오염물증착, 마모, 결빙)으로 인해 흡입면에서 불규칙한 와류가 발생할 것으로 예상되며 시간 변화에 따른 유동장의 변동성이 크게 나타날 것으로 판단됨에 따라 비정상(Transition)상태 해석을 수행하였다. HEXA mesh를 이용한 오염 및 마모조건 Total Simulation time은 0.8s, Time step은 0.0005s로 설정하였으면 Hybrid(trimmer mesh & prism layer)격자를 사용한 결빙조건 Total simulation time은 10s, time step은 0.001s로 설정하였다. 수렴 판정 여부는 각 iteration 별 RMS residual 값이 10^{-4} 이하를 만족하고, 모니터링 된 양·항력계수 값이 안정화된 상태를 수렴되었다고 판단하였다.

입구 경계면은 균일 속도 유입 조건을 적용하였으며, 난류강도는 0.01%로 설정하였다. 출구 경계조건은 Environmental Pressure Outlet 조건을 적용하였고, 에어포일 벽면은 No-slip 조건을 부여하였다.

유동공간은 Reynolds number가 높을수록 에어포일과 경계조건간의 이격거리를 더욱 확장시켰다. High Reynolds number 조건의 유동해석 수행 시 출구경계면에서 Reversed flow가 발생할 가능성이 높으며 이는 해의 수렴성을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 에어포일로부터 입구경계면까지의 유동공간을 Chord length에 최소 20배 이상, 출구경계면까지는 40배 이상으로 확보하였다.

4.1.4 결빙 해석기법 검증

항공기 날개 혹은 풍력터빈 블레이드 표면에서 발생하는 결빙 현상을 예측하기 위해, 여러 연구기관에서는 ice simulation 프로그램을 이용한 관련연구를 활발히 수행하고 있다. 대표적인 해석 프로그램으로는 Lagrangian 기반의 LEWICE와

Eulerian 기반의 FENCEP-ICE가 있다. 또한 오늘날 상용 CFD코드(STAR-CCM+)의 지속적인 기술 개발로 인해 DMP(Dispersed Multiphase droplet)모델 혹은 LMP(Lagrangian Multiphase droplet)모델을 이용한 결빙해석이 가능해졌다. 본 연구에서는 STAR-CCM+에서 지원하는 DMP 모델을 이용하여 결빙해석을 수행 하였으며 결빙 해석 신뢰성 검증을 위해 Horold E. Addy 등에[27] 의해 수행된 결빙실험 결과(Business jet : Run 213 - 2min, Run 214 - 6min)와 비교하는 선행해석을 진행하였다. 선행해석 수행 시 적용되는 해석조건은 Table 4-3에 나타낸 바와 같이 실험조건과 동일하게 설정하였다.

Figure 4-4에 Business jet 에어포일의 결빙실험 결과와 수치해석기법을 이용하여 예측된 에어포일의 결빙형상을 비교하여 나타내었다. CFD 해석결과는 정체 점에서 멀어질수록 압력면에 증착되는 결빙 양이 과소 예측되는 경향이 있으나, 전반적으로 증착되는 얼음의 패턴과 두께가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 DMP 모델을 이용하여 에어포일 전연 에 증착되는 결빙형상을 예측하였다.

Table 4-3 Icing condition used in the wind tunnel test

Condition	Value
Total Temperature(°C)	-5.9
Static Temperature(°C)	-10
Velocity(m/s)	90
AOA(°)	6.2
LWC(g/m ³)	0.6
MVD(um)	15
Chord length(cm)	90
Sparry Time(min)	2.0, 6.0

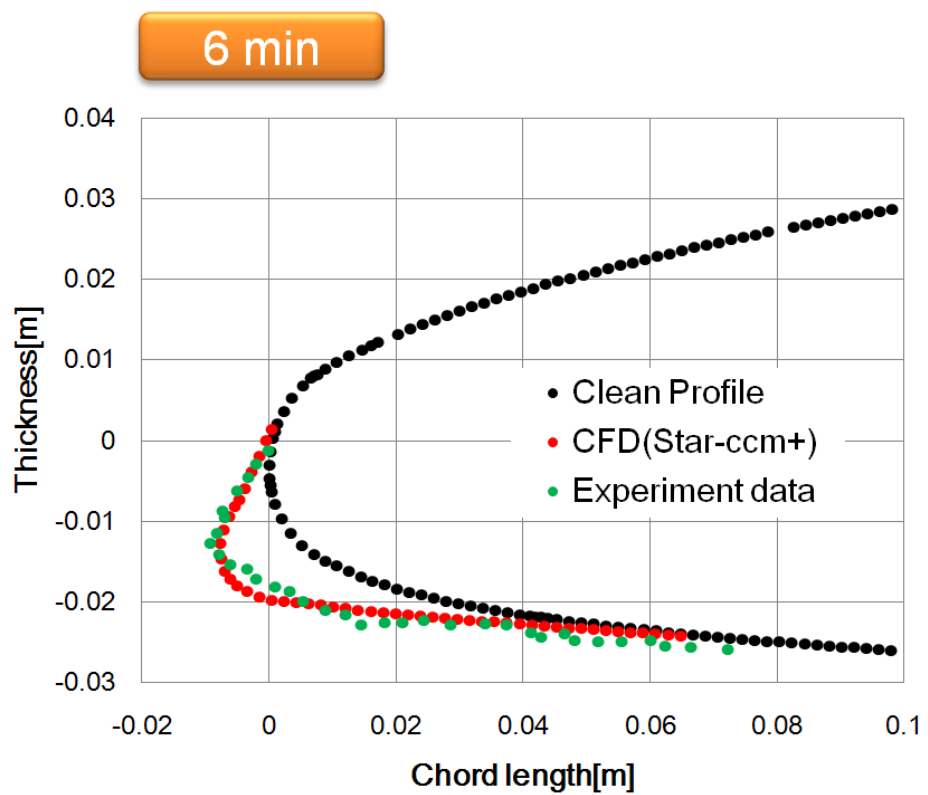
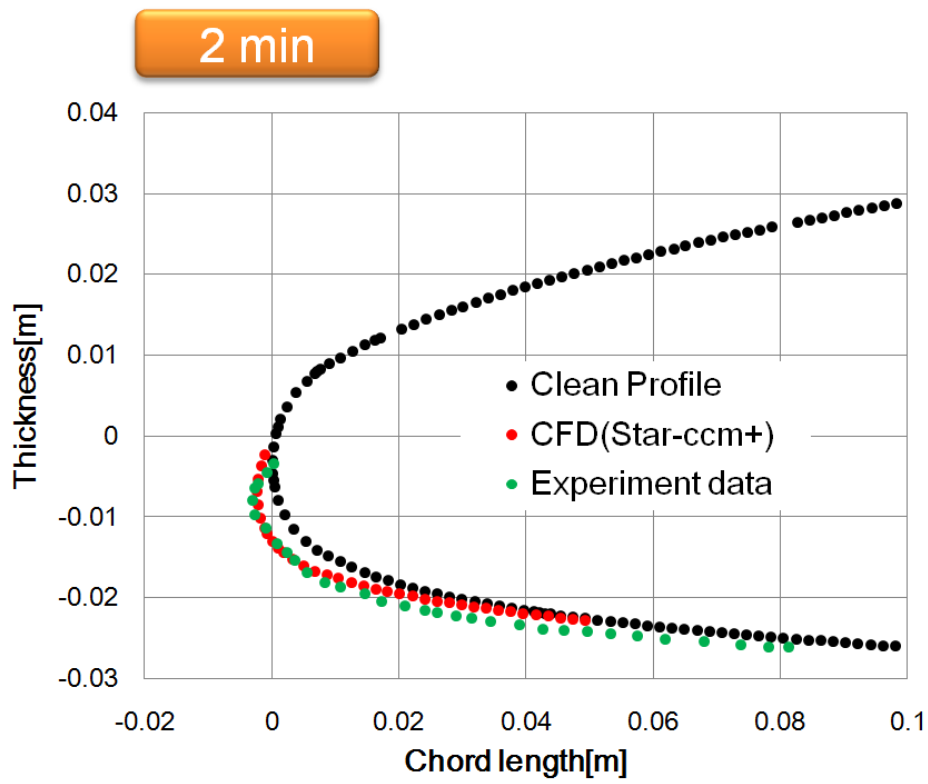


Fig. 4-4 Verification of CFD analysis method through comparison with experiment data and CFD result

4.1.5 ESGR(Equivalent Sand Grain Roughness)

대부분의 상용 CFD 코드들은 표면 거칠기가 존재하는 Rough wall의 Modeling을 위해 ESGR 값을 적용한다. Nikuradee 등은 배관 내부유동에 대한 실험적 연구를 통해 ESGR 추정 식을 최초로 제안하였으나, 이는 표면 거칠기의 형상과 분포 유형을 고려하지 못하는 문제점이 있었으며, 이후 Sigal 등에 의해 식(4-1)과 식(4-2)와 같은 수정된 ESGR 추정 식이 제안되었다.[28]

$$A_s = \left(\frac{S}{S_f}\right)\left(\frac{A_f}{A_s}\right)^{-1.6} \quad \text{식(4-1)}$$

$$\frac{K_s}{K} = \begin{cases} 0.00321A_s^{4.925} & 1.400 \ll A_s \ll 4.89 \\ 8 & 4.890 \ll A_s \ll 13.25 \\ 151.71A_s^{-1.1379} & 13.25 \ll A_s \ll 100 \end{cases} \quad \text{식(4-2)}$$

여기서 K_s 와 K 는 각각 ESGR과 Roughness height를 의미하며 A_s 는 Roughness Parameter 이다. 여기서 S 는 reference area of the smooth surface before adding on the roughness를, S_f 는 Rough surface의 Total frontal area, A_f 는 single roughness element의 Frontal area를 나타내며, A_s 는 바람이 유입되는 방향에 접하는 Single roughness element의 표면적을 의미한다. S/S_f 와 A_f/A_s 는 각각 밀도변수와 형상변수로 정의된다.

Sigal 등이 제안한 식을 이용하여 ESGR을 계산하기 위해서는 밀도변수, 형상변수 및 Roughness height에 관한 값들이 명확히 정의되어야하며 실제 풍력터빈 블레이드에 발생하는 Roughness는 다양한 형상과 높이를 갖으며 불규칙한 군집분포로 증착되기 때문에 이들이 제시한 식(4-1)과 식(4-2)를 적용하는데 다소 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 신뢰성 있는 ESGR를 산출하기 위해 W.A Timmer 등에 의해 수행된 roughness 유무에 따른 NACA64-618 에어포일 풍동시험과 동일한 조건에서의 CFD simulation을 수행하였으며, 실험결과와 simulation 결과를 비교하여 관련변수 값을 결정하였다. W.A Timmer 등의 연구에서는 에어포일 전연으로부터 코드길이의 8% 해당하는 면적에 0.28mm

carborundum grains(grit number 60)연마제를 부착하여 표면 거칠기를 모사하였다. 따라서 본 연구에서는 carborundum grains의 높이를 K 로 결정하였으며, Figure 4-5에 나타낸 바와 같이, roughness element shape을 정사각형으로 가정하여 형상변수를 1로 결정하였다. 풍동시험 조건과 동일하게 S 값을 에어포일 전연의 8%로 하였으며, S_f 의 변화에 따라 계산된 ESGR 값에 대한 정보를 Table 4-4에 나타내었다.

이상과 같은 오염조건에서 수행된 CFD해석 결과와 풍동실험 결과를 Table 4-5에 나타내었다. 대표적인 에어포일의 공력성능지표인 양·항비를 비교한 결과, 전체 오염면적(8%) 중 S_f 가 차지하는 면적이 2.68%인 조건에서의 CFD 결과가 모든 받음각 범위에서 풍동시험 결과와 가장 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 table 1에 나타낸 오염조건 값들과 선정된 밀도변수를 이용하여 오염상태변화에 따른 CFD simulation에 필요한 ESGR 계산하였다. 또한, 마모상태변화에 따른 CFD simulation의 경우, $K=0.3\text{mm}$ 조건에서 계산된 ESGR 값을 마모가 존재하는 영역에 적용하였다.

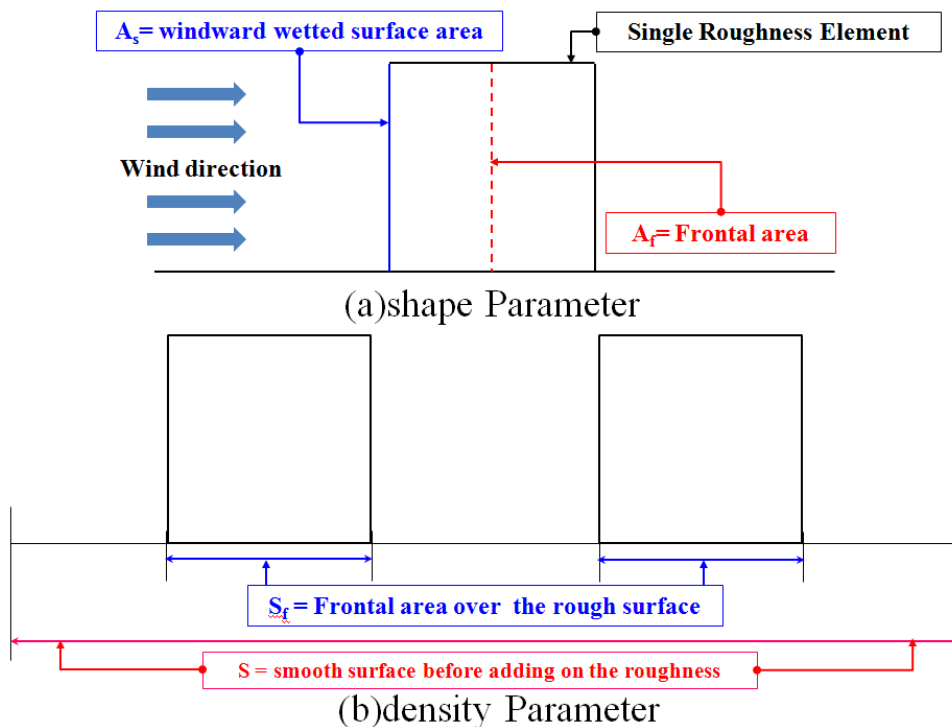


Fig. 4-5 Shape and density parameters used for calculating the ESGR

Table 4-4 ESGR for various S_f

Roughness height[mm]	A_f/A_s	S_f [%]	ESGR
0.28	1	3.36	0.067
		3.04	0.1
		2.88	0.143
		2.64	0.2
		2.48	0.27

Table 4-5 Results of the wind tunnel test and CFD simulations for Various S_f

AOA(°)	CFD Simulation					Wind tunnel		
	Rough					Clean	Clean	Rough
	S_f (=3.36)	S_f (=3.04)	S_f (=2.88)	S_f (=2.64)	S_f (=2.48)			
	C_L/C_D	C_L/C_D	C_L/C_D	C_L/C_D	C_L/C_D	C_L/C_D	C_L/C_D	C_L/C_D
0	82.94	81.51	62.85	40.22	39.85	104.31	84.35	38.89
2	95.63	115.94	62	53.12	94.89	127.98	127.37	54.27
4	70.07	69.29	68.52	61.77	60.85	132.56	167.85	60.36
6	70.48	69.65	68.98	67.91	62.25	123.25	121.98	59.86
8	65.24	64.21	63.43	62.63	60.14	108.22	100.63	49.17

4.2 CFD 결과 및 고찰

4.2.1 오염 및 마모조건 공력성능 분석

NACA64-618 에어포일 전연의 오염 및 마모상태 변화에 따른 공력성능 변화율 분석을 위해 받음각 $-5^{\circ} \sim 16^{\circ}$ 구간에 대한 비정상 CFD 유동해석을 수행하였다.

Figure 4-6에 에어포일 전연부에 오염 및 마모가 가장 심각하게 발생하는 조건인 Case-9(오염물 증착높이 : 0.3mm 오염 면적 50%)와 Case-12(erosion Heavy) 조건의 양력계수와 항력계수를 나타내었다. 두 조건 모두 Clean 조건에 비해 공력성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 양력계수 및 항력계수 모두 6° 이하의 받음각 조건에서 유사한 성능감소율을 보이거나, 그 이상의 받음각 구간에서 점차적인 차이를 보였다. 특히, 받음각이 높은 구간일수록 에어포일 공력성능이 큰 폭으로 감소하고 있으며, 양력계수의 경우 전연의 상태에 따라 Stall Point가 변화하는 특징을 나타낸다. Clean airfoil은 stall point가 14° 에서 나타나는 반면, case-9와 case-12의 stall point는 각각 12° 와 8° 에서 확인되었다. 이는 에어포일의 표면 거칠기 증가 또는 마모로 인한 전연 부 형상 변형이 유동박리 현상을 조기에 발생시켜 나타나는 것으로 판단된다. 받음각 변화에 따른 에어포일의 주변부의 속도분포 및 Streamline을 통해 Stall 현상에 직접적인 원인이 되는 박리 점(separation point)의 위치 및 순환영역을 확인하였다. Figure 4-7는 양력이 큰 폭으로 감소하는 Case - 12조건의 에어포일 주변부의 속도분포와 Streamline으로, 받음각이 커질수록 에어포일 벽면을 타고 흐르는 유동의 속도가 후연에서 더욱 감소되는 것을 확인할 수 있다.

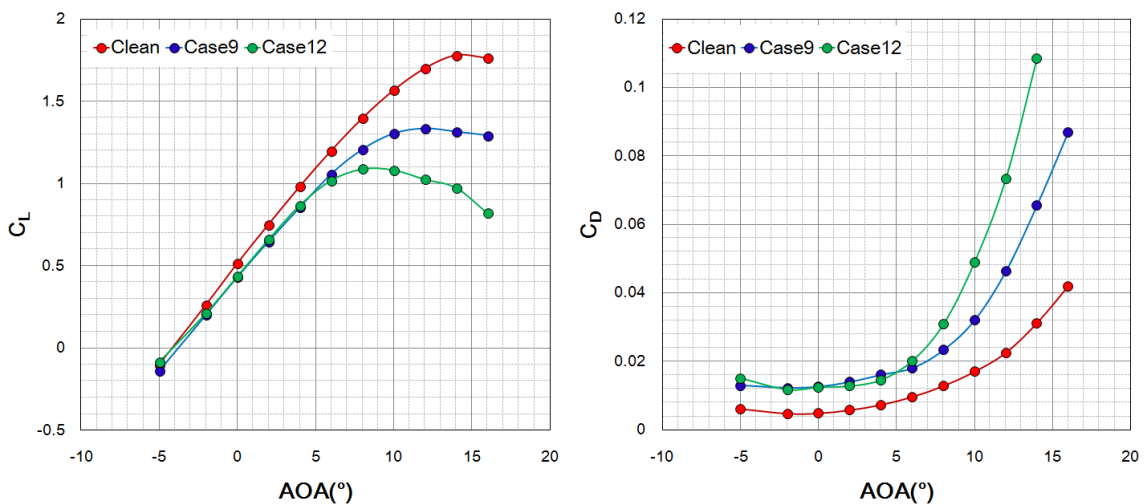


Fig. 4-6 Variation in lift coefficient with surface conditions of the blade

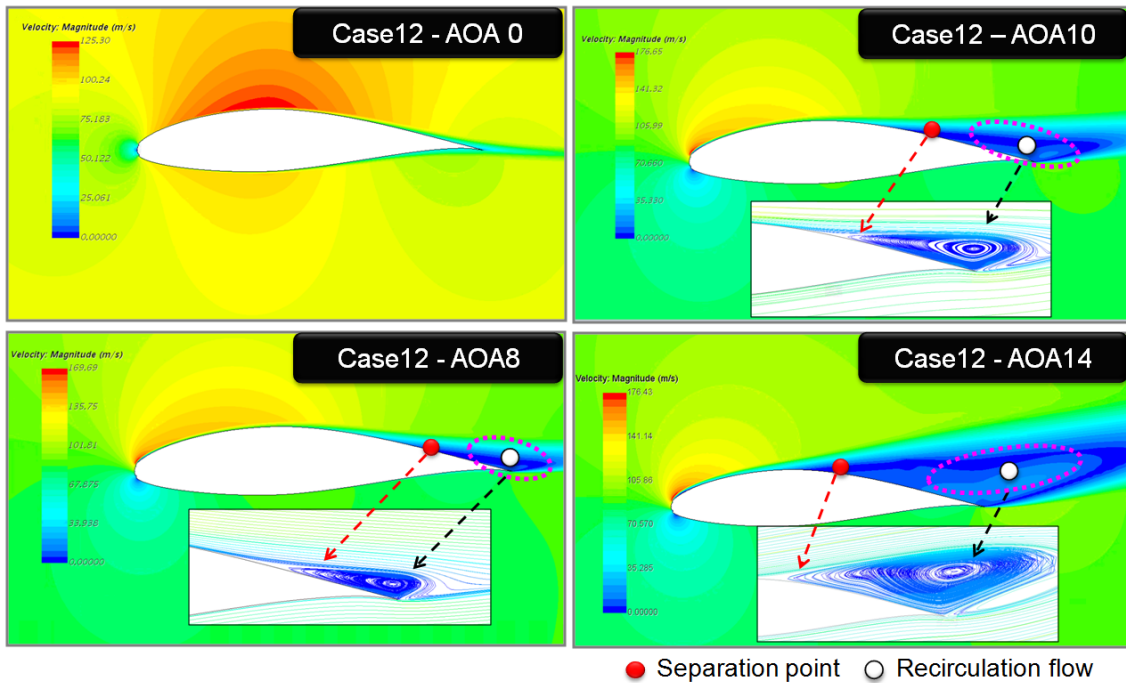


Fig. 4-7 Velocity contour around airfoil with Erosion condition(Case12 - Heavy)

실속이 발생하는 8°의 받음각 조건부터 속도가 0이 되는 순환영역과 유동이 이탈하는 박리 지점이 확인되며 속도 변동성이 큰 High angle of attack 조건일수록 순환 영역은 더욱 확대되고 박리지점은 후연에서 전연으로 서서히 이동하였다. 이와 같은 현상은 블레이드 손상정도에 따라 차이를 보일 것으로 판단되며, Case - 12 조건보다 더욱 심각한 손상조건의 경우 Deep stall 현상이 발생할 수 있을 것으로 예상된다. CFD simulation을 통해 확보한 오염 및 마모조건 별 공력성능 변화율을 각각 Table 4-6와 Table 4-7에 나타내었다. 동일한 simulation 조건에서의 해석된 clean airfoil에 관한 CFD 결과를 기준으로, 양력계수와 항력계수의 증가 및 감소율을 +, - 기호로 표현하였다. 오염 조건의 경우, 오염물의 증착 높이와 범위가 증가할수록 공력성능이 감소하며, 양력계수는 최대 34% 감소 항력계수는 최대 159% 증가하였다. 반면 마모 조건의 경우, 압력면으로부터 흡입면까지 마모 영역이 확장되며, 마모 깊이가 증가할수록 공력 성능이 더욱 악화되었으며, 양력계수는 최대 53% 감소하고, 항력계수는 최대 314%까지 증가하는 결과를 나타내었다. 이를 통해 마모현상으로 발생하는 블레이드 손상이 오염현상 보다 공력성능에 더욱 불리한 영향을 줄 것으로 판단되며 팁 에어포일의 전연 부 오염 및 마모에 의한 공력성능 저하는 풍력터빈의 AEP 손실에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다.

Table 4-6 Error rates of drag coefficient under various contamination and erosion conditions at the leading edge of airfoil

AOA (°)	Contamination Condition [%]									Erosion Condition [%]		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-5	45	48	52	48	55	65	87	98	111	44	61	145
-2	65	67	73	124	137	152	125	140	157	57	67	145
0	57	60	67	126	140	155	130	142	159	48	121	156
2	85	92	98	111	124	138	112	126	141	82	106	120
4	74	81	86	76	104	115	93	106	119	65	74	99
6	62	69	74	64	94	82	67	77	87	53	68	109
8	55	62	67	57	68	76	61	72	82	47	72	140
10	56	64	69	60	72	80	65	77	88	49	93	188
12	67	75	81	73	84	96	77	91	105	63	126	225
14	74	79	86	79	88	101	85	96	110	73	151	247
16	80	83	88	85	92	100	91	99	107	83	155	314

Table 4-7 Error rates of lift coefficients under various contamination and erosion conditions at the leading edge of airfoil

AOA (°)	Contamination Condition [%]									Erosion Condition [%]		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-5	3	3	3	3	3	6	29	31	34	-1	-1	-18
-2	-5	-5	-5	-19	-20	-22	-19	-21	-23	-3	-5	-19
0	-4	-4	-5	-13	-14	-16	-14	-15	-16	-3	-13	-15
2	-10	-12	-11	-11	-12	-13	-11	-13	-14	-2	-11	-12
4	-9	-10	-10	-9	-12	-13	-10	-12	-13	-8	-9	-12
6	-9	-10	-10	-9	-10	-11	-9	-11	-12	-8	-10	-15
8	-10	-11	-11	-10	-12	-13	-11	-12	-14	-8	-12	-22
10	-11	-13	-14	-12	-14	-16	-13	-15	-17	-10	-18	-31
12	-15	-16	-17	-16	-18	-20	-17	-19	-22	-14	-25	-40
14	-19	-20	-21	-20	-22	-24	-21	-23	-26	-19	-32	-45
16	-20	-21	-23	-22	-23	-25	-23	-25	-27	-21	-35	-53

4.2.2 착빙(Icing accretion)

NREL 5MW 풍력터빈 블레이드의 반경 70%(Section A), 77%(Section B), 83%(Section C), 89%(Section D), 97%(Section E) 단면에 대한 결빙시뮬레이션을 수행하였으며, 받음각 변화에 따라 착빙되는 결빙의 특성을 분석하기 위해 광범위한 받음각 조건(-5°, 0°, 5°, 10°, 12°, 15°)의 결빙형상을 확보하였다.

Figure 4-8에 각각의 계산단면에서 확보된 Mass 증가량과 Total mass을 나타내었다. NREL 5MW 풍력터빈의 Tip 영역은($r/R > 70\%$) 정격풍속 조건에서 받음각이 4.92° ~ 5.3° 내에서 변화하기 때문에 받음각 5° 조건에서 결빙된 무게를 이용하여 Total Mass를 계산하였다. 각각의 해석단면에서 산출된 Mass 증가량은 해석단면의 위치 및 받음각 변화에 따라 증착되는 얼음의 무게가 결정되었다. Section E 단면에서 최대 2.07kg, Section A 단면에서 최소 0.1kg 가량 증가하였으며, 하나의 블레이드 Tip 영역에 발생된 Total Mass 증가량은 21.33kg으로 추정된다.

Section A ~ Section E 단면에서 확보된 결빙형상을 Figure 4-9 ~ 4-13에 나타내었다. 블레이드 전연에서 발생하는 결빙은 상대풍속의 크기가 증가할수록 결빙의 두께와 면적이 선형적으로 증가하며 상대풍속이 가장 높은 Section E 단면에서 가장 활발히 발생되었다. 정체 점 근방에서 충돌효율이 가장 높기 때문에 정체 점과 전연 부 사이에서 집중적으로 얼음이 증착되며 받음각이 커질수록 충돌한계점이 압력면 영역으로 확장되어 결빙영역이 점차적으로 확장되는 특징을 보였다.

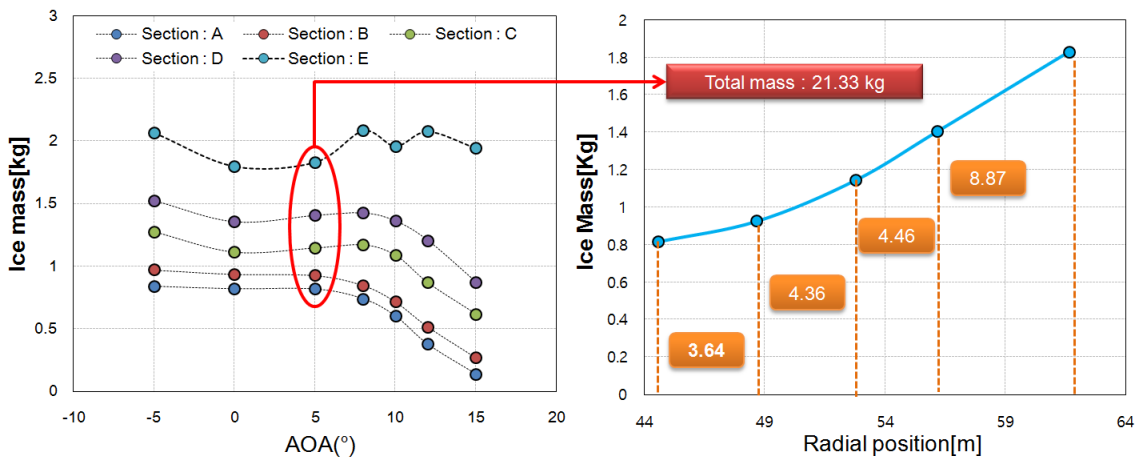


Fig. 4-8 Mass of ice accumulated at the blade tip area

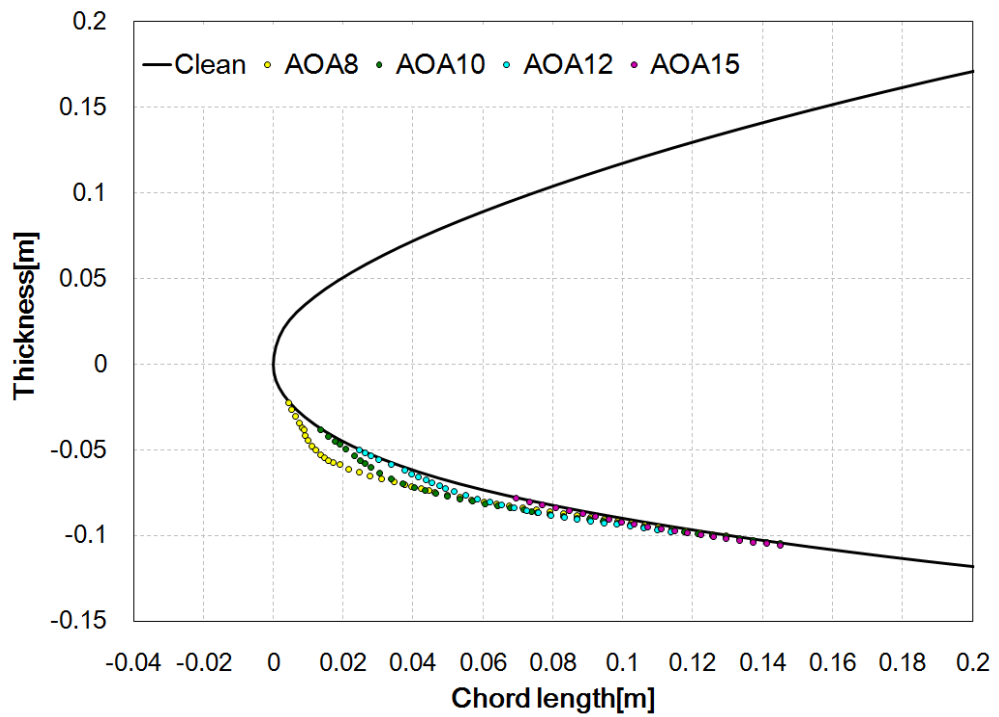
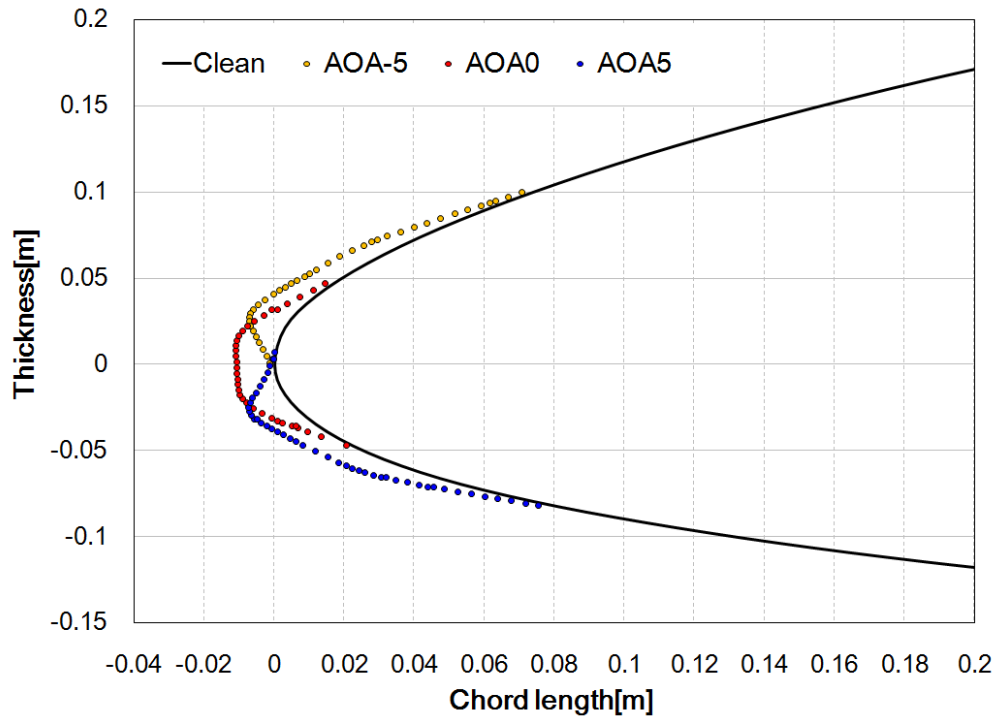


Fig. 4-9 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section A)

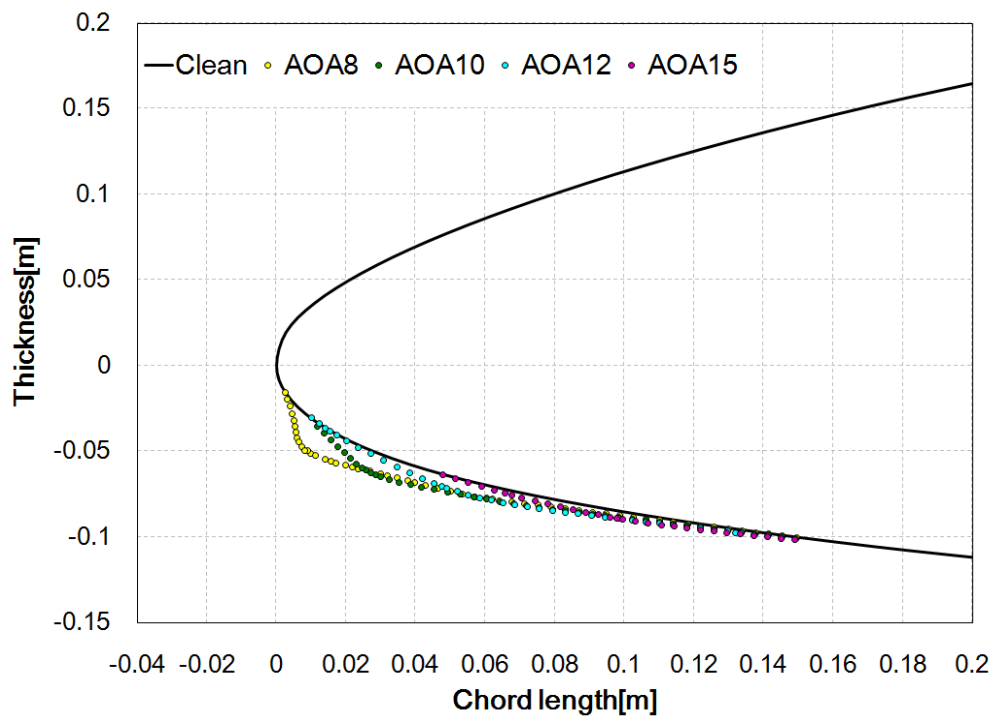
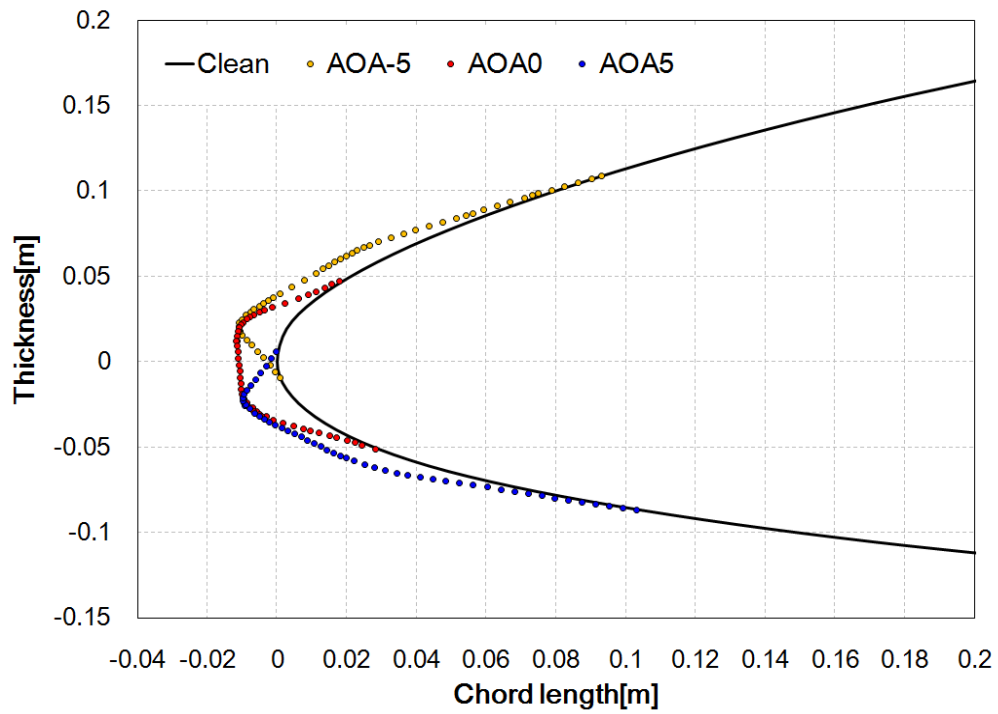


Fig. 4-10 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section B)

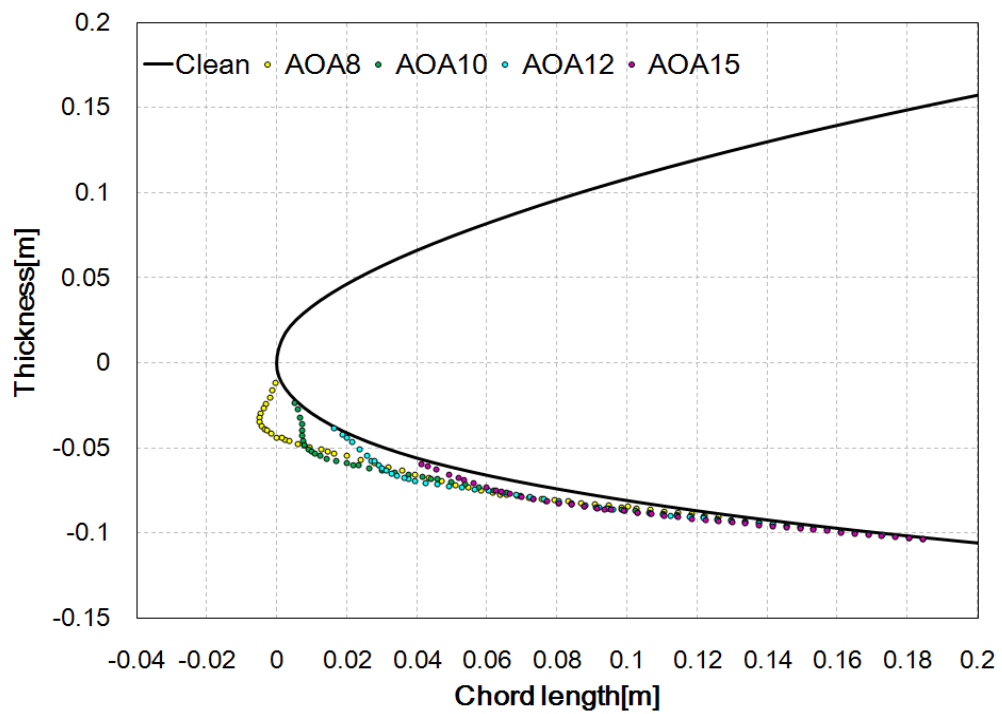
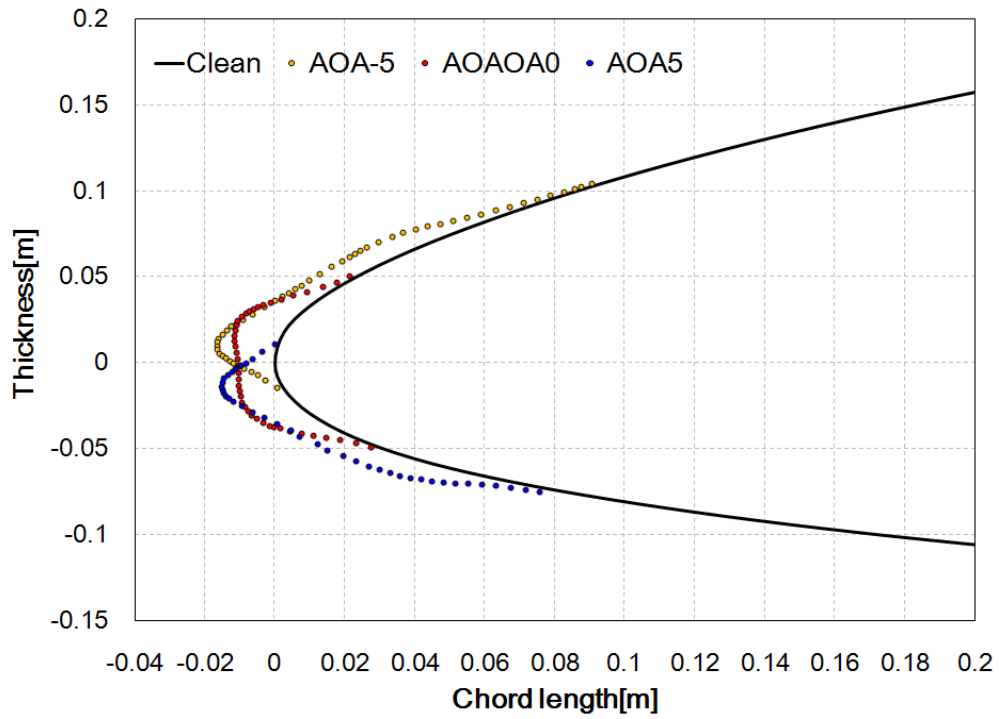


Fig. 4-11 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section C)

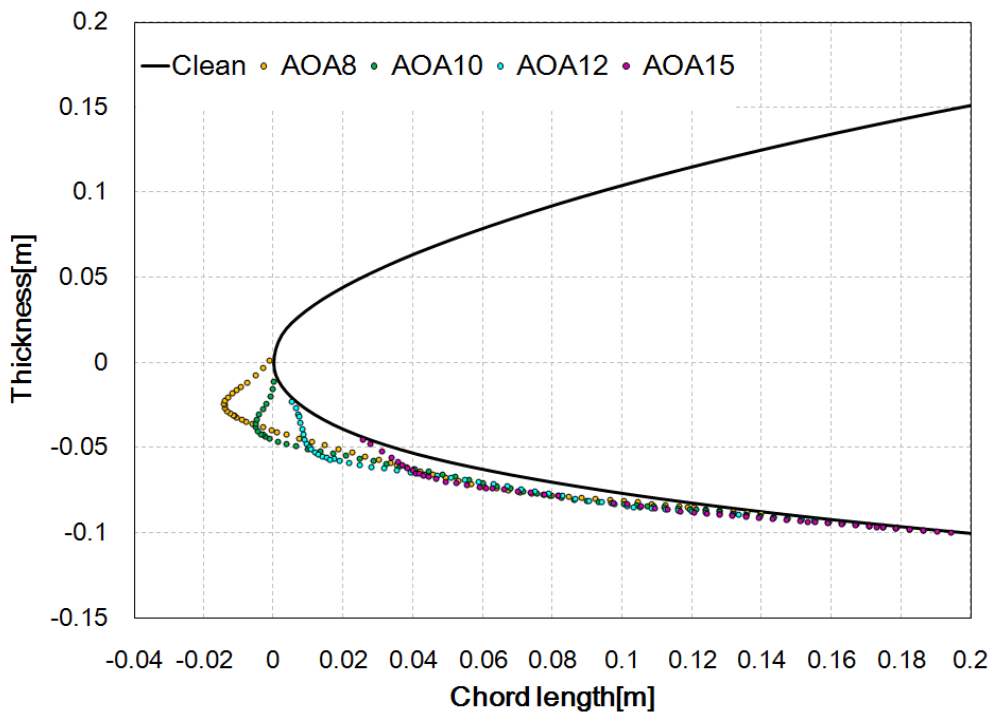
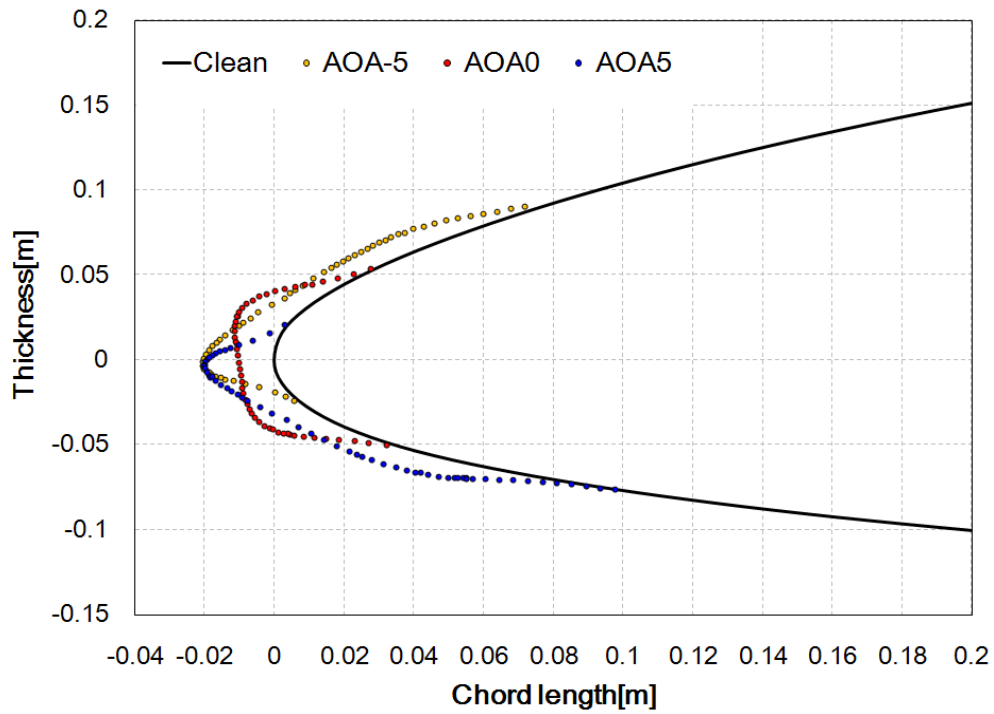


Fig. 4-12 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section D)

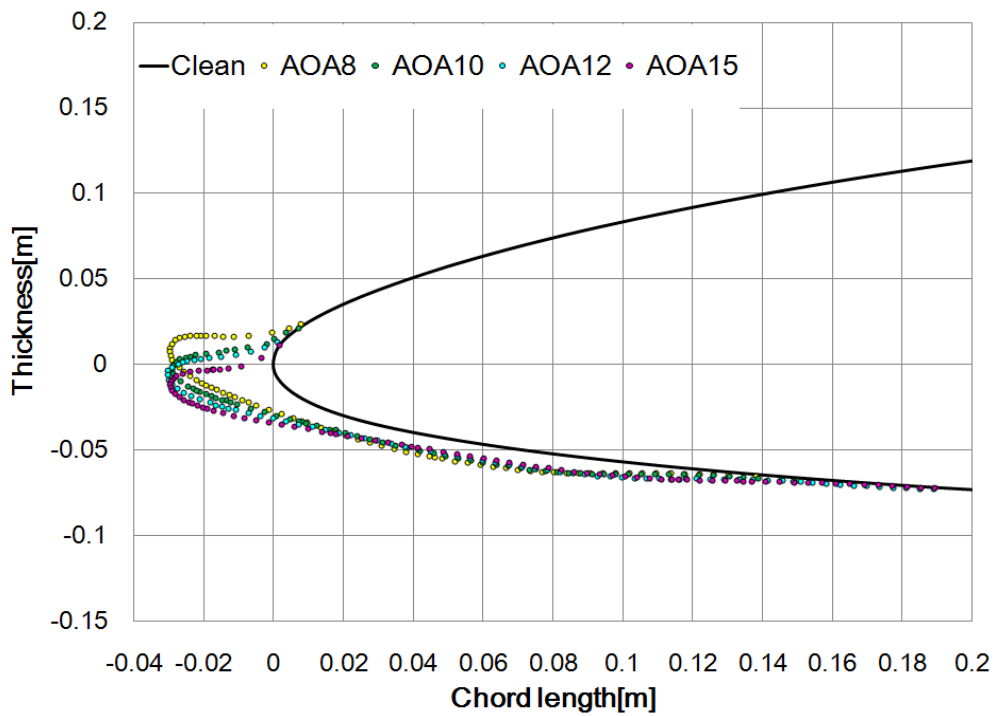
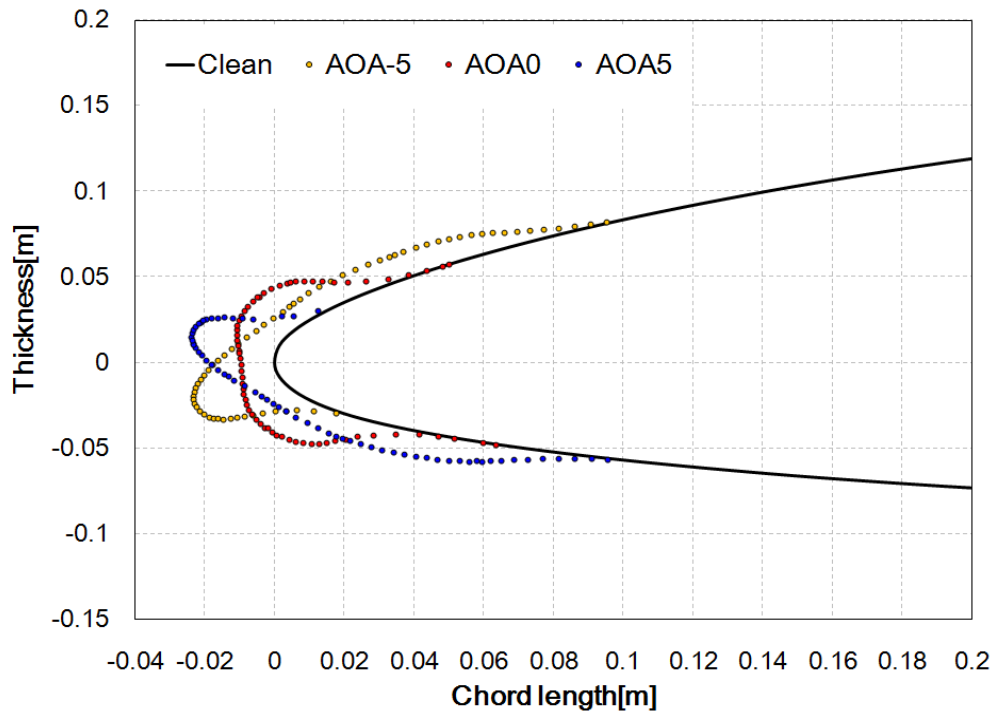


Fig. 4-13 Shape of ice at the leading edge of airfoil (Section E)

4.2.3 결빙조건 공력성능 분석

Eulerian 기반의 DMP 모델을 이용한 삼차원 유동해석을 통해 에어포일의 결빙형상을 예측하였다. 또한 외부환경조건에 따라 다양한 형태로 얼음이 증착되는 에어포일의 공력성능을 분석하기 위해, 삼차원 결빙형상을 2D 형상으로 변환하여 비정상 CFD 유동해석을 수행하였다.

Figure 4-14에 각각의 해석단면에서 확보된 Clean 조건과 ice 조건의 양·항비를 제시하였다. Clean 조건에서 해석된 각각의 section 별 양·항비를 분석한 결과, Section E를($Re = 900$ 만) 제외한 Section A ~ D의($Re =$ 약 1300만) 양·항비가 비교적 유사한 경향을 나타냈었다. 8° 이하의 받음각 조건에서 Section E의 양·항비가 가장 우수한 경향을 보였으나, 10° 이상의 받음각 조건부터 양·항비가 가장 낮게 예측 되었다. 이와 같은 결과는 Reynolds 수에 따라 변동하는 항력계수의 특성변화로 나타나는 현상이라 판단된다. 앞서 2-2장에 언급한 바와 같이, 에어포일 항력은 완전난류상태의 유동조건에서 임계 Reynolds 도달하게 되면 항력은 급격히 감소하다 서서히 증가하는 현상이 발생한다. 이로 인해 Reynolds가 낮은 Section E의 공력성능이 특정 영역에서 우수한 성능결과를 보이는 것으로 판단된다.

Iced - 에어포일은 Clean 에어포일에 비해 모든 계산단면에서 양·항비가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 Section E 단면은 결빙현상으로 인한 에어포일 고유의 형상이 가장 많이 변형됨에 따라 양·항비가 큰 폭으로 감소하였고, 블레이드 tip 영역에 도달할수록 공력성능이 더욱 악화되었다.

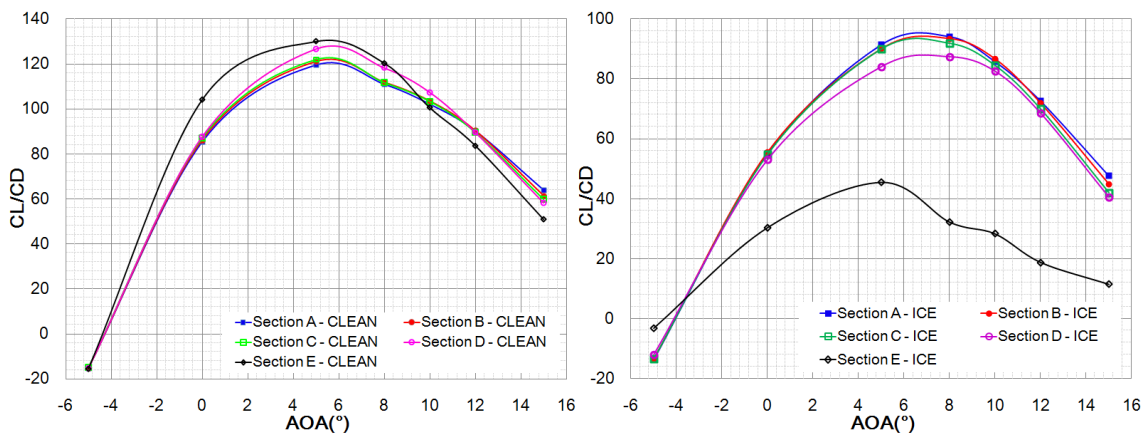


Fig. 4-14 Lift-Drage ratio with different angle of attack under clean and ice conditions

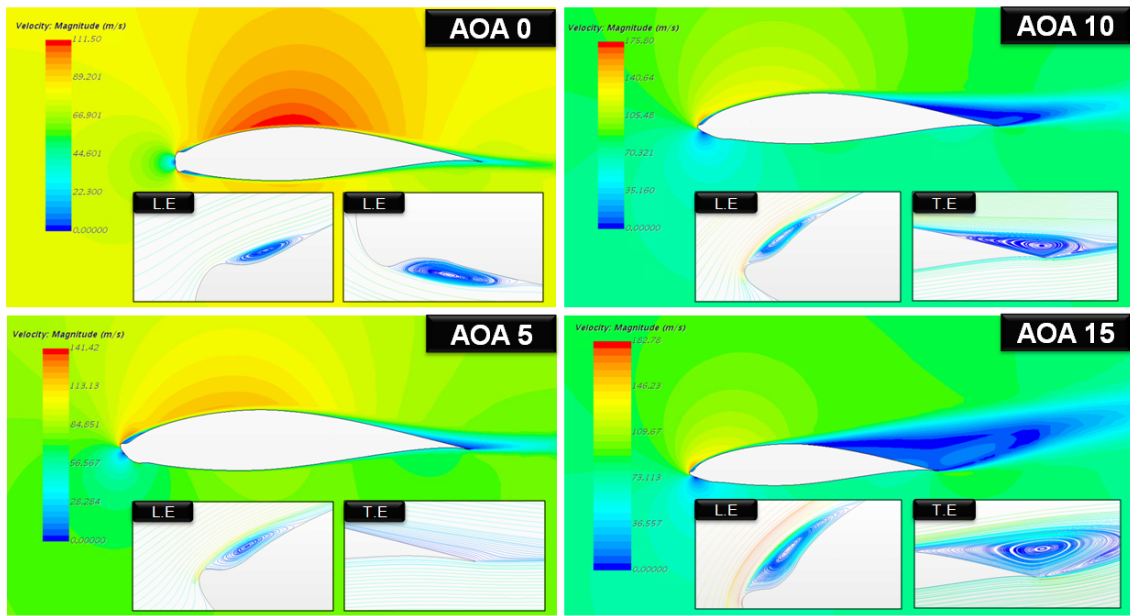


Fig. 4-15 Velocity contour around airfoil with icing condition(Section E)

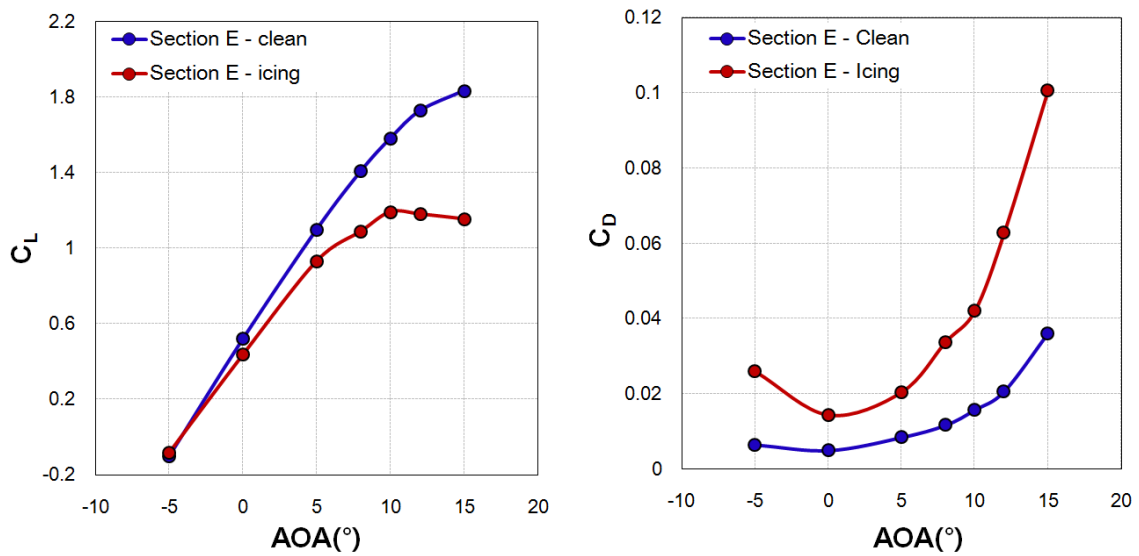


Fig. 4-16 Variation in lift and drag coefficient with ice condition

Figure 4-15에 결빙이 가장 심하게 형성된 Section E 단면의 속도분포와 Streamline을 나타내었다. 얼음이 증착된 에어포일 앞전 영역에서 순환유동 (Circulation flow)이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 받음각 0° 조건에서는 전연 부를 중심으로 에어포일 흡입면과 압력면에 결빙이 대칭적으로 형성됨에 따라 두 면에서 순환영역이 동시에 관찰되었다. 하지만 0°와 같이 받음각이 낮은

조건은 속도구배가 상대적으로 작아 벽면을 타고 흐르는 유동 이탈현상(유동박리)이 나타나지 않았다. 10°이상의 높은 받음각 조건에서는 에어포일 후연에서 순환영역이 확인되었으며, 받음각이 커질수록 그 영역이 더욱 확장되었다.

Figure 4-16에 Section E 단면에서 확보된 Clean에어포일과 Ice 에어포일의 공력 성능을 나타내었다. Clean 조건에 비해 공력성능이 상당히 감소하였으며, 특히 8° 이상의 받음각 조건부터 성능이 급격하게 저하되었다. Ice 에어포일의 양력계수 결과를 통해 받음각 10°조건에서 실속지점을 확인할 수 있으며, 받음각이 커질수록 공력성능 감소율이 더욱 증가하는 양상을 보인다.

결빙현상에 의한 에어포일의 공력성능 변화율을 분석하기 위해 Clean 에어포일의 해석 결과를 기준으로 양력계수의 감소율과 항력계수의 증가율을 Table 4-8에 나타내었다. 각각의 단면에서 확보된 공력성능은 전연에서 발생하는 결빙양이 증가할수록 더욱 악화되며 양력계수는 최대 37% 감소 항력계수는 최대 298% 증가하였다. Section E를 제외한 나머지 단면에서의 공력성능 감소율은 상대적으로 작지만, 결빙현상이 장기간 지속될 경우 블레이드 전연 부 착빙이 더욱 심각하게 발생되어 풍력터빈의 출력 및 하중에 악영향을 미칠 것으로 예상된다.

Table 4-8 Error rates of lift and drag coefficient under icing conditions at the leading edge of airfoil

AOA (°)	Section A		Section B		Section C		Section D		Section E	
	CL	CD	CL	CD	CL	CD	CL	CD	CL	CD
-5	20%	35%	18%	34%	20%	35%	20%	53%	-17%	298%
0	-6%	46%	-5%	47%	-6%	49%	-6%	55%	-16%	187%
5	-4%	26%	-4%	29%	-4%	30%	-6%	42%	-15%	142%
8	-3%	14%	-3%	16%	-3%	18%	-4%	29%	-23%	189%
10	-3%	15%	-3%	16%	-4%	18%	-4%	24%	-25%	168%
12	-4%	19%	-4%	21%	-5%	22%	-5%	24%	-32%	205%
15	-7%	25%	-7%	27%	-8%	30%	-9%	31%	-37%	180%

V. 블레이드 손상상태에 따른 AEP 손실률

5.1 AEP 산출 조건

에어포일의 전연 부 오염 및 마모상태에 따른 공력성능 변화율이 풍력터빈의 AEP에 미치는 영향에 대한 정량적 분석을 위해, Integrated load calculation software인 BLADED(DNV)를 이용하여 NREL 5MW reference wind turbine system의 수치 모델링을 실시하였다.

블레이드 모델링 시에는 다양한 운전조건에서의 출력 및 하중을 계산하기 위해, 각 계산 단면 별로 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 의 받음각 범위를 갖는 공력데이터를 입력해야 한다. 따라서 본 연구에서는 제한된 받음각 범위 내에서 얻어진 CFD 해석결과를 Viterna 보정식(Tangler model)에[29] 적용하여 -180° 부터 180° 영역의 확장된 공력 성능데이터를 확보하였다.

Blade root section(0%)으로부터 약 70% 지점까지의 계산 단면에는 참고문헌에 기술된 clean 에어포일들의 공력데이터를 적용하였으며, NACA 64-618 에어포일로 구성되는 계산 단면에는 블레이드 표면손상 별(오염, 마모, 결빙) 얻어진 확장된 공력성능 데이터를 적용하였다.

풍력터빈의 AEP 계산에 필요한 steady power curve를 얻기 위해 steady power calculation을 수행하였다. 성능곡선 산출 시, 오염 및 마모조건은 공기밀도는 1.225kg/m^3 (15°C 기준)을, 결빙조건은 1.314kg/m^3 (-8°C 기준)을 적용하였으며, 손상조건에 따라 계산된 출력곡선 중 변화율이 가장 큰 마모조건(Case 10 - Light, Case 12 - Heavy)의 결과를 Figure 5-1에 나타내었다.

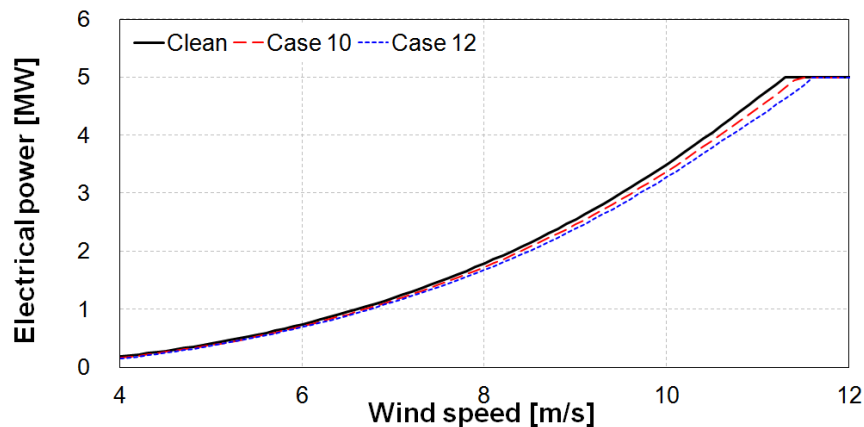


Fig. 5-1 Effects of surface erosion conditions on output power (Clean, Case10, Case12)

팁 에어포일 영역에서의 표면 손상이 심각해질수록 정격풍속이 지연되었으며, 정격풍속 이전의 구간에서 출력이 감소하였다. 반면, 정격풍속 이후의 구간에서는 피치제어의 영향으로 일정한 정격출력을 유지하였다.

풍력터빈의 AEP 계산을 위해 Weibull probability density function을 적용하였다. 식 (5-1)을 이용하여 풍속 별 발생빈도 $f(V)$ 를 계산 할 수 있으며, 평균 풍속 \bar{V} 는 식(5-2)를 통해 계산 될 수 있다[30]. 식 (5-3)는 AEP 계산식으로써 풍속별 출력 값인 $P(V)$ 와 풍속별 발생 빈도 $f(V)$ 의 함수로 표현된다. 오염 및 마모와 결빙에 대한 공기밀도는 각각 1.225 kg/m^3 , 1.314 kg/m^3 , shape parameter k 는 2로 설정하였으며, availability를 100%로 가정하여 평균풍속 8m/s 조건에서의 블레이드 전연부 오염 및 마모상태 변화에 따른 AEP를 계산하였다.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{\bar{V}}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad \text{식 (5-1)}$$

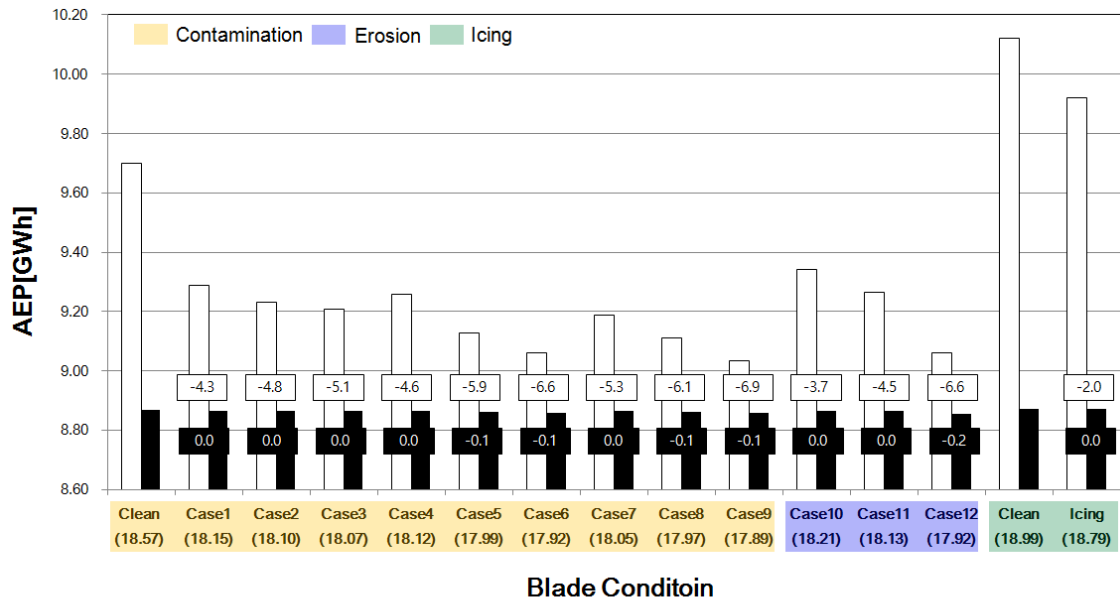
$$\bar{V} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad \text{식 (5-2)}$$

$$P_W = 8760h \times \int_{cutin}^{cutout} [P(V) \times f(V)] \quad \text{식 (5-3)}$$

5.2 AEP 손실률 분석

Figure 5-2에 블레이드 손상 상태 별 AEP 손실률을 나타내었다. 5.1장에 언급한 바와 같이, 정격이전과 이후구간의 출력곡선이 차이를 보임에 따라 AEP 손실률을 분리하여 나타내었으며, 각 조건별 total AEP 손실률은 두 값을 더하여 산출하였다.

블레이드 표면손상에 따른 AEP 손실율은 정격풍속이하 구간에서 지배적으로 나타났으며 최소 2.3%에서 최대 6.9% 감소되었다. 반면 블레이드 피치제어가 작동되는 정격풍속 이후 구간에서는 AEP 감소율은 최대 0.2%로 손실이 거의 발생되지 않았다. 이 같은 AEP 손실은 풍력터빈의 제어시스템과 밀접한 관련이 있다. NREL 5MW 풍력터빈은 가변속도-가변피치 제어방식으로 정격풍속 이전 구간은 발전기의 torque를, 정격풍속 이후 구간은 블레이드 피치각도를 제어한다. 따라서 정격풍속 이전 구간에서 블레이드의 공력성능 저하가 발생될 경우, 발전기 회전속도가 감소



□ AEP reduction ratio [%] - Before rated ■ AEP reduction ratio [%] - After rated

Fig. 5-2 AEP loss under various airfoil surface conditions

하여 많은 출력손실을 초래 할 수 있다. 반면 피치 제어를 하는 정격 이후구간에서는 공력 성능저하가 심각할수록 피치각도를 fine 방향으로 제어하여 손실된 공력 성능의 일부를 회복시킬 수 있기 때문에 AEP 손실을 최소화 할 수 있다.

정격풍속 이전 구간에서는 블레이드 팁 영역($r/R > 70\%$)의 받음각이 $2.68^\circ \sim 7.59^\circ$ 범위 내에서 변화한다. 이 구간에서의 공력성능 변화와 AEP 감소율 변화의 상관관계를 검토하기 위해 Figure 5-3에 풍속 별(4m/s, 8m/s, 12m/s) 양·항비 감소율을 나타내었다.

블레이드 전연의 오염상태 변화에 따라, 양·항비 감소율은 4m/s에서 최소 39%, 최대 65%를 나타냈으며, AEP 손실을 범위는 4.3%(case-1) ~ 7%(case-9) 이다. 마모조건인 경우, 양·항비 감소율은 4m/s에서 최소 34%(case-10) 최대 63%(case-12)로 나타났으며, AEP 손실을 범위는 3.7%(case-10) ~ 6.8%(case-12) 이다. 결빙조건인 양·항비 8m/s 풍속조건에서 최소 27% 4m/s 풍속조건에서 최대 35% 감소율을 보이며 AEP 손실율은 2%로 확인되었다.

4.2.절에 기술한바와 같이, 마모조건인 오염 및 결빙조건에 비해 상대적으로 성능저하가 더욱 크게 나타났지만, 최대 AEP 손실율은 오염조건(Case - 9)에서 가장 높게 측정되었다.

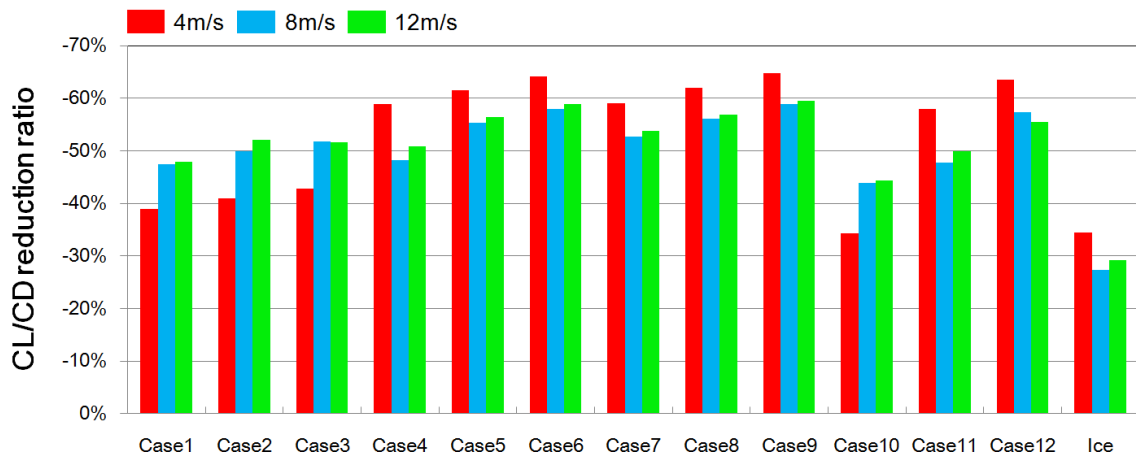


Fig. 5-3 Lift-Drag reduction ratio under various airfoil surface conditions

이는, 정격풍속 이하 조건에서 블레이드 팁 영역의 받음각 변화 범위가($2.68^{\circ} \sim 7.59^{\circ}$) 상대적으로 크지 않으며, $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 이하의 받음각 조건에서 오염조건(Case - 9)의 공력성능저하가 가장 크게 발생되었기 때문이다. 반면 결빙조건의 AEP 손실율은 매우 제한된 결빙 지속시간(1 hour)에서 얻어진 공력성능 데이터를 통해 AEP를 산출했기 때문에 손실률이 가장 적게 발생되었다.

VI. 결론

본 연구에서는 블레이드 표면손상상태가 풍력터빈의 AEP 변화에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석결과를 제시하였다. Transient CFD Simulation을 통해 NACA64-618 에어포일의 공력성능 데이터를 확보하였으며 결빙 시뮬레이션 수행 시, Eulerian 기반의 DMP 모델을 이용하여 에어포일 전연의 결빙형상 및 Mass 증가량을 예측하였다. CFD 해석을 통해 확보한 공력성능데이터는 NREL 5MW 풍력터빈 모델에 적용하여 블레이드 손상 상태에 따른 AEP 손실율을 산출하였다.

에어포일 전연에 오염물이 증착된 경우, clean 에어포일에 비해 양력계수가 최대 27% 감소하였으며, 항력계수는 최대 159% 증가하였으며, 마모의 경우에는 양력계수가 최대 53% 감소, 항력계수는 최대 314% 증가하였다. 에어포일 전연에 얼음이 착빙된 경우(Simulation time : 1hour), 양력계수는 최대 37% 감소하며, 항력계수는 최대 298% 증가함을 보였다.

Reference wind turbine을 이용한 steady power calculation을 통해 블레이드 손상 상태 별 AEP 손실률을 계산한 결과, 오염 및 마모 조건은 최대 7%와 6.8%의 손실률을 나타내며, 결빙 지속시간이 매우 제한된 결빙조건인 AEP 손실률은 2%로 가장 낮게 측정되었다. AEP 손실은 정격풍속 이전구간에서 지배적으로 나타났으며, 피치제어가 이루어지는 정격풍속 이상구간에서는 손실된 공력성능의 일부를 회복시키기 때문에, AEP 손실률이 상대적으로 작게 나타났다. 따라서 풍력터빈의 제어시스템 (stall type / pitch type)에 따라 블레이드 손상으로 인한 AEP 손실률에 차이를 보일 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] N. Dalili, A Edrsy, R Carriveau, A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance, renewable and sustainable energy, November 7, 2007
- [2] Mohammed G. Khalfallah, Aboelyazied M. Koliub, "Effect of dust on the performance of wind turbines," Desalination, Vol. 209, No, 1-3, pp.209-220, April30,2007
- [3] Corten GP, Veldkamp HF. Insects cause double stall. Copenhagen : EWEC, 2001
- [4] Corten GP, Veldkamp HF. Insects can halve wind-turbine power. Nature 2001; 412:41
- [5] Spruce, C. J., "Power Performance of Active Stall Wind Turbines with Blade Contamination," Proceedings of European Wind Energy Conference, Athens, Greece, 2006.
- [6] Eduardo Garcia Perez, Wind farm owner's view on rotor blades from O&M to design requirements, International Conference Wind Turbines Rotor Blade O&M 2014.
- [7] Matthew Carl Homola, Impacts and Causes of Icing on Wind Turbines
- [8] jasinski, W.J., et al., wind turbine performance under icing conditions. Transactions of the ASME, journal of solar energy engineering, 1998.
- [9] Ganander, H., Ronsten, G. (2003), "Design Load Aspects due to Ice Loading on Wind Turbine Blades", Proceedings of the 2003 BOREAS VI Conference.
- [10] Summary of Wind Turbine Accident data, Caithness windfarm Informatio Forum, 2014. 6
- [11] Jianxin Ren, Jinping Ou, " Dust effect on the performacne of Wind Turbine Airfoils." J. Electromagnetic Analysis & Applications, 2009, 1: 102 -107
- [12] Agrim Sareen, Chimay A. Sapre and Michael S. Selig. Effects of leading edge erosion on wind turbine blade performance. Wind Energy 2014; 17:1531 - 1542
- [13] Clement Hochart, Guy Fortin and Jean perron. "Wind turbine performance under icing conditions. Wind energy 2008;11:319-333
- [14] 서상호, 명현국, 김경천, 배신철, 김문상, 전호환, 김희동, 최영돈, 유체역학 개정 5판, 텍스트북스, 2016
- [15] Yunus A. Cengel, John . Cimbala. FLUID MECHANICS : Fundamentals and Applications, 2nd Edition. MCGraw-Hill, Korea, 2009
- [16] Flow Illustrator. "Overview of common fluid flow phenomena", <http://www.flowillustrator.com/fluid-dynamics/overview-of-common-fluid-flow-phenomena.php> (accessed November 23, 2016)
- [17] ISO 12494. "Atmospheric icing of structures". Geneva, 2001
- [18] Thomas F.Gelder, William H.Smyer, "Experimental Droplet Impingement on several Two - Dimensional Airfoils with Thickness", NACA TN 3839, 1956
- [19] W.A. Timmer, "An overview of NACA 6-digit airfoi. series characteristics with reference to airfoils for large wind turbine blades", AIAA 2009-268

- [20] J Jonkman, S Butterfield, W Musial and G Scott, "Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore wind system development," National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 2006.
- [21] New scientist. "Freeze airframe: Targeting an icy killer in flight."
<https://www.newscientist.com/article/mg21028106-100-freeze-airframe-targeting-an-icy-killer-in-flight>
 (accessed November 23, 2016)
- [22] Matthw C. Homola, Muhammad S. Virk, Tomas Wallenius, Per J. Nicklasson, Per A. Sundsbo. " Effect of atomspheric temperature and droplet size variation on ice accretion of wind turbine blades
- [23] Muhammad S.Virk, Matthew C.Homola, Per J. Nicklasson. "Atomspheric icing on large wind turbine blades" International journal of Energy And Environment. Volume 3, Issue 1, 2012 pp.1-8
- [24] IRA H., Abbott, Albert E. von Doenhoff and Louis S. Stivers Jr, Summary of Airfoil Data - Report No. 824, National Advisory Committee for Aeronautics, pp.195. 1945
- [25] CD-adapco, "Star-ccm+ v9.04.011-R8 User Guide"
- [26] M.M. Profir, "Automated moving mesh techniques and re-meshing strategies in CFD applications using morphing and rigid motions." Technical Report. April 12, 2012
- [27] Harold E. Addy, Jr. "Ice Accretions and Icing Effects for Modern Airfoils" Gleen Research Center, Cleveland, Ohio, April 2000, NASA/TP-2000-210031
- [28] Sigal,A., and Danberg, J E., "Analysis of Turbulent Boundary Layer Over Rough Surfaces With Application to Projectile Aerodynamics." Army Ballistic Research Lab, Aberdeen Proing Grounds MD, Technical Report. 1988 BRL-TR-2977
- [29] Larry A. Viterna and Robert D. Corrigan. "Fixed pitch rotor performance of large horizontal axis wind turbines", NASA Lewis Research Center Cleveland, Ohio, 1982
- [30] I. kwon, J. Kim, I. Paek and N. Yoo, "Variation of capacity factors by weibull shape parameters," Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No.1, 2013.