



### 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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

역설계 과정을 통한  
3kW 풍력발전기 블레이드의  
CAD 데이터 생성 및 공력해석

제주대학교 대학원

에너지응용시스템학부 기계공학전공

김 민 균

2022년 8월

역설계 과정을 통한  
3kW 풍력발전기 블레이드의  
CAD 데이터 생성 및 공력해석

지도교수 김 남 진

김 민 균

이 논문을 기계공학 석사학위 논문으로 제출함

2022년 5월

김민균의 기계공학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장            강 창 남

위 원            김 남 진

위 원            현 명 택



제주대학교 대학원

2022년 5월

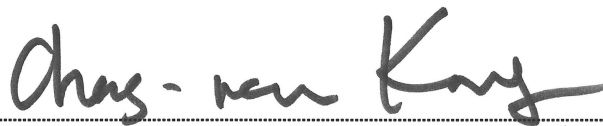
CAD data generation and aerodynamic analysis  
of 3kW wind turbine blades through the  
reverse design process

Min-Guyn Kim  
(Supervised by professor Nam-Jin Kim)

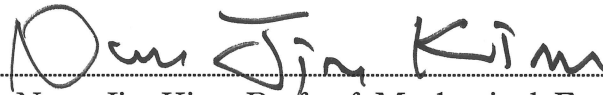
A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the  
degree of Master of Science in Mechanical Engineering

2021. 5.

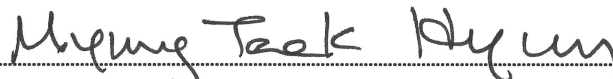
This thesis has been examined and approved.



.....  
Thesis director, Chang-Nam Kang, Prof. of Mechanical Engineering



.....  
Thesis director, Nam-Jin Kim, Prof. of Mechanical Engineering



.....  
Thesis director, Myung-Teak Hyun, Prof. of Mechanical Engineering

2022. 05.  
.....

Date

Department of Mechanical Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	viii
SUMMARY .....	ix
I. 서론 .....	1
1.1 연구 배경 및 필요성 .....	1
1.2 연구 목표 .....	4
II. 이론적 배경 .....	5
2.1 역설계 .....	5
2.2 소형풍력발전기 .....	8
2.3 수평축 소형터빈 블레이드 .....	9
2.4 풍력터빈 블레이드의 공기역학적 이론 .....	11
2.4.1 Actuator disk이론 .....	11
2.4.2 운동량 이론과 동력계수 .....	12
2.4.3 블레이드 요소 운동량 이론 .....	15
III. 연구 방법 .....	21
3.1 풍력터빈 블레이드 역설계 및 해석 .....	21
3.1.1 Solutionix C500 .....	24
3.1.2 에어포일 취득 및 CAD 작성 .....	29
3.1.3 역설계 블레이드의 공력해석 .....	32
3.1.4 해석 조건 및 가정 .....	34

IV. 결과 및 토의 .....	36
4.1 역설계 블레이드 설계변수 분석 및 CAD 작성 .....	36
4.2 역설계 에어포일 분석 .....	45
4.3 역설계 로터블레이드 공력해석 .....	49
4.4 역설계 터빈의 성능해석 및 검증 .....	57
4.5 에어포일 변경에 따른 공력성능 비교 .....	60
4.6 역설계 터빈의 최적 RPM 도출 및 해석 .....	66
V. 결론 .....	68
참고문헌 .....	69

## LIST OF FIGURES

Fig. 1 Principle of progress over time of nationally determined contribution [1] .....	2
Fig. 2 Reverse engineering process .....	5
Fig. 3 Contact coordinate measuring machine .....	7
Fig. 4 Non-contact coordinate measuring machine .....	7
Fig. 5 Airfoil nomenclature[3] .....	10
Fig. 6 Comparison of Different taper types for blade[4] .....	10
Fig. 7 An energy extracting actuator disk and stream-tube[5] .....	11
Fig. 8 Blade Element Sweeps Out an Annular Ring .....	15
Fig. 9 Blade Element Velocities and Forces .....	16
Fig. 10 A-3kW wind turbine blade .....	21
Fig. 11 Reverse engineering design and analysis process .....	23



Fig. 12 Solutionix C500 .....	25
Fig. 13 Blade measurement setup used Solutionix C500 .....	27
Fig. 14 3D scan results of wind turbine blade .....	27
Fig. 15 Opaque polygon mesh of wind turbine blade .....	28
Fig. 16 Solid CAD data after post-processing .....	28
Fig. 17 The projected airfoil of cross-section of blade .....	30
Fig. 18 Acquire airfoil coordinates .....	30
Fig. 19 Point coordinate selection using AutoCAD .....	31
Fig. 20 Point coordinate extraction using AutoCAD .....	31
Fig. 21 Graphical user interface of Q-Blade v0.96[13] .....	33
Fig. 22 Software modules inside Q-Blade[14,15] .....	33
Fig. 23 Create a blade surface .....	38
Fig. 24 Deviation analysis of the generated surface .....	38

Fig. 25 Radial length of reverse engineered airfoil section .....	39
Fig. 26 Acquisition of design variables .....	39
Fig. 27 Reverse design blade drawing 1/3 .....	43
Fig. 28 Reverse design blade drawing 2/3 .....	43
Fig. 29 Reverse design blade drawing 3/3 .....	44
Fig. 30 User interface for airfoil design .....	46
Fig. 31 Boundary-layer at 9° angle of attack around a REA 03 .....	47
Fig. 32 Pressure distribution at 9° angle of attack around a REA 03 .....	47
Fig. 33 User interface for XFOIL direct analysis .....	48
Fig. 34 Polar extrapolation to 360° at REA 10EA .....	48
Fig. 35 Input data for blade design at Q-Blade .....	50
Fig. 36 Airfoil comparison .....	52
Fig. 37 HAWT REA blades In Q-Blade .....	52

Fig. 38 Reverse engineered blade model in Catia v5 .....	53
Fig. 39 Create a reverse engineered blade model for analysis in Q-Blade .....	53
Fig. 40 Power coefficient of Reverse engineering blade .....	54
Fig. 41 Torque coefficient to blade circumferential speed ratio .....	54
Fig. 42 Power prediction for blade wind speed at various RPM .....	55
Fig. 43 Thrust prediction for blade RPM at various wind speeds .....	55
Fig. 44 Torque prediction for blade RPM at various wind speeds .....	56
Fig. 45 Bending Moment Prediction for Blade RPM at Various Wind Speeds	56
Fig. 46 Comparison of REAB and A-Blade .....	58
Fig. 47 TSR of revers engineering wind turbine .....	58
Fig. 48 Cp of revers engineering wind turbine .....	59
Fig. 49 Modelling of a blade with a changed design .....	61
Fig. 50 Power generation to blades used different airfoils .....	64

Fig. 51 Power Coefficient to blades used different airfoils ..... 64

Fig. 52 Power coefficient compared to TSR of blades ..... 65

Fig. 53 Optimal RPM of Revers engineering airfoil blade ..... 67

Fig. 54 Comparison of power generation between REAV and A-balde with optimal RPM applied ..... 67

## LIST OF TABLES

Table 1. Specifications of A-3kW wind turbine generator .....	22
Table 2. Generator power of A-3kW wind turbine .....	22
Table 3. Solutionix C500 scan scan parameters[11,12] .....	26
Table 4. Specifications of Solutionix C500[11,12] .....	26
Table 5. The RPM according to the wind speed at A-3kW wind turbine ....	35
Table 6. REA coordinates(Radius 650mm) .....	40
Table 7. Dimensionless number REA coordinates .....	41
Table 8. REA blade design data .....	42
Table 9. Design variable data that can be input into Q-Blade .....	51
Table 10. Blade with S822 input on reverse design data base .....	62
Table 11. Blade with S822, S823 input on reverse design data base .....	63

## SUMMARY

Reverse design is a design technique that can identify design intentions from products that exist differently from the order of conceptual design, development, and commercialization, and reproduce the process before commercialization from the information.

Recently, renewable power generation facilities have a significant proportion of parts imported from major leading countries, and if there is a problem with the facilities, it takes a long time to maintain them, or they have no choice but to manufacture products that meet the existing facility standards.

Therefore, after 3D scanning of the wind generator blade through the reverse design process, a model available for CAD/CAM/CAE was designed, and the aerodynamic performance was analyzed to verify the performance of the model.

As a result, it was confirmed that the performance of the reverse designed blade was 6.01% different from that of the original product, but when the wind speed is 5 m/s or higher, the difference in performance is 2.28%, which is very accurate and similar. In addition, drawings necessary for blade manufacturing could be prepared, and 10 airfoil were obtained. Through this process, reverse design and application can be applied in all fields that can be designed and manufactured in automobiles, agricultural machinery, aircraft, and military industries, and it can be the basis for localization to secure domestic technology.

# I. 서론

## 1.1 연구 배경 및 필요성

온실가스 배출량 증가, 기후 변화 등의 환경문제는 우리나라를 포함한 전 세계적으로 문제가 되고 있다. 국제사회에서는 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol) 발효 이후, 일부 국가의 감축의무 부담 거부와 경제성장을 목표로 하는 개발도상국의 급격한 온실가스 배출량 증가와 같이 복합적인 이유로 온실가스 배출량 제한이 한계에 이르렀다.

이에 기후 위기에 대응하기 위해 새로운 체제가 필요하다는 공감대가 형성되어, 2015년 12월 12일, 프랑스 파리 제21차 기후 변화에 관한 유엔 기본 협약(UNFCCC) 당사국 총회에서 파리협정(Paris Agreement)이 체결되며 주로 온실가스 배출량 감축이 초점인 교토의정서와 달리, 장기 온도목표 달성을 위해 각국이 기후 변화 대응 및 온실가스 감축 목표인 국가결정기여(NDC, Nationally Determined Contribution)를 스스로 결정하여 제출하도록 하여 일방적으로 부여하던 감축목표를 각국이 자율적으로 설정할 수 있도록 보장되며 장기 목표 달성을 위한 시간 경과에 따라 파리협정의 목표 수준은 Fig. 1과 같이 이전 NDC 대비 강화되어야 하는 진전원칙(Progression over time)을 적용하기로 합의하였다.

특히 기후 위기가 대두되고 있는 상황에서, 2018년에 정부간협의체(IPCC)가 기후 변화에 관한 지구 온난화 1.5°C 특별보고서를 발간한 이후, 과학적 근거로 1.5°C 상승 억제의 중요성이 더욱 두드러지며 제26차 당사국총회를 통해, 본격적으로 산업화 이전 대비 2°C보다 낮은 수준으로 유지와 1.5°C 상승 억제를 추구하기 때문에 2°C/1.5°C 목표로도 불리며 파리협정의 대표 온도목표가 되었다.

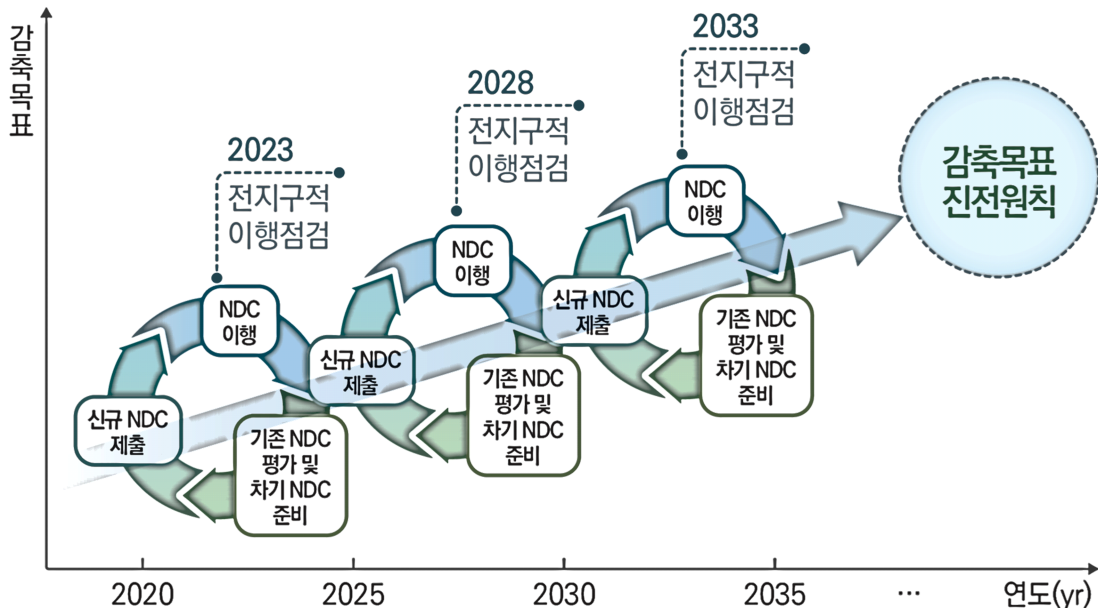


Fig. 1 Principle of progress over time of nationally determined contribution [1]

아울러 IPCC는 보고를 통해 협정의 1.5°C 상승 억제 목표를 달성하기 위해서는, 2030년까지 2010년 온실가스 배출량 대비 45% 감축과 2050년까지 규정하는 6대 온실가스(이산화탄소, 이산화질소, 메탄, 용불화황, 수소불화탄소, 과불화탄소)의 배출량을 (+)로 흡수량을 (-)로 하였을 때 그 합인 순 배출을 0(Zero)로 만들어야 하는 넷-제로(net-zero)를 달성해야 한다고 제시하였다.

이후 세계 각국은 자발적으로 온실가스 감축 목표를 제시하였고, 주요 국가는 이미 탄소중립을 법제화하였으며, 국내에서는 2017년 탄소배출 감소의 필요성과 더불어 기존 화석연료의 고갈과 환경오염 등과 같은 이유로 2030년까지 청정에너지 발전 비중을 20%까지 증가시키는 ‘재생에너지 3020 이행계획’의 추진과 2020년에는 넷-제로와 비교하여 6대 온실가스 중, 오직 이산화탄소의 순 배출만 제로화하는 ‘2050 탄소중립 계획’을 선언하며 태양광, 풍력과 같은 재생에너지로의 전환이 활발히 이루어지고 있다.

세계풍력에너지위원회(GWEC, Global Wind Energy Council)에 따르면 세계 풍력산업 시장이 2021년의 성장률은 2020년과 비교하여 1.8% 감소하였지만, 예외



적으로 COVID-19 대유행 상황이 발생하였음에도 약 94GW 정도가 증가하는 경향을 나타내며 두 번째로 높은 성장률을 기록하였다[2]. 신재생에너지의 사용 비중이 세계적으로 계속해서 성장 중인 가운데, 이미 가동 중인 발전시설 또한 규모가 상당하며 태양광과 풍력터빈에 설계에 관한 연구와 예측진단과 같은 유지보수와 관련된 연구도 꾸준히 진행되고 있다.

특히 우리나라의 경우, 국내 풍향 조건과 국토 면적의 제한을 고려하여 소형터빈의 개발 또한 이루어졌으며, 최근 2021년에는 국내 최초로 영국과 대만 등, 해외 해상풍력의 선도국가에서만 시행 중인 ‘국산화 비율 반영제(LCR, Local Content Rule)’ 또한 발표되었고, 지난해 12월, 완도금일해상풍력 사업에도 적용되었다. 하지만 앞으로 해상풍력에 사용되는 부품의 국산화율 비중이 50% 이상일 경우에만 신재생에너지공급인증서인 REC 가중치를 추가로 받을 수 있다는 조건부 시행이다. 따라서 일부 비율의 국산화가 이루어지고 있는 가운데, 아직 국산화가 필요한 부품 또한 매년 발생할 수도 있다는 것으로도 판단된다.

이처럼 국내에도 신재생 발전설비의 확장을 위해, 기술적인 부분과 국산화를 위한 정책 수립과 다양한 과제를 수행하고 있다. 특히 풍력터빈의 경우에는 고가의 설비들로 이루어져 있을 뿐만 아니라 예상치 못한 결함이 발생할 수도 있으며, 국산화가 이뤄지지 않았거나 국내 생산품이더라도 더 이상 생산되지 않는 단종된 부품에 한해서는 재가동까지의 유지보수나 제품을 확보하기까지 시간적 비용적 손실을 감수해야 한다.

유지보수 또한 제조사의 인력이 국내에 없게 될 경우, 해외 인력이 직접 방문해야 하는 어려움이 있다. 즉 신재생에너지 발전시설의 국내 독자 개발뿐만 아니라 유지보수 관점에서 바라보더라도, 국산화에 대한 중요성을 확인할 수 있으며, 이러한 문제를 해소하기 위해서는 규격에 맞는 제품을 새로 설계하거나, 기존 형상을 통해 부품의 공정을 개발 및 재제조하여 사용하는 수밖에 없다. 따라서 본 논문에서는, 국산화의 기반이 될 수 있는 3차원 스캐닝 기법을 이용한 역설계 방식의 적용 가능성을 재현해 보고자 한다.

## 1.2 연구 목표

현재 풍력발전기 설계를 주제로 한 연구는 활발히 진행되고 있으며, 수입에 의존하던 부품의 국산화에 중요성을 강조하였다.

따라서 본 연구에서는, 여러 분야에서 다양하게 적용되고 있는 3D 스캐닝 역설계 과정을 통해 소형풍력발전기의 주요 부품 중 하나인 블레이드를 스캔하였고, 획득한 데이터를 통해 3D 모델의 구현과 제조를 위한 CAD(Computer-Aided Design) 데이터의 생성 및 설계에 대한 성능을 검증하는 공력해석을 수행함으로써 다양하게 활용할 수 있는 역설계 기반 데이터의 효용성에 대하여 검증하고자 한다.

## II. 이론적 배경

### 2.1 역설계

기계공학에서 역설계(Reverse Engineering)란, 역공학이라고도 불리며 개념설계, 개발, 제품화의 순서와는 다르게, 존재하는 제품으로부터 설계 의도를 파악하고, 그 정보로부터 제품화 이전의 과정을 재현할 수 있는 설계기법이며, 설계변경을 통해 최적 설계, 경제적 공정설계를 새로 구상할 수 있다는 것에 의미가 있다. 주로 설계 데이터가 존재하지 않는 실물의 표면 형상을 3차원 측정기로 측정하여 취득한 3차원 점군 데이터(Point Clouds)의 결과로부터 제도(Drafting)를 위한 컴퓨터 지원 설계(CAD, Computer Aided Design) 데이터를 생성하고, 공정설계 및 제작과 수치제어(NC, Numerical Control) 코드를 출력하기 위한 사전단계인 컴퓨터 지원 제조공정(CAM, Computer Aided Manufacturing)에 활용하거나, 제품의 설계단계에서 공학적인 구조와 성능에 대한 해석과 최적 설계를 수행하는 컴퓨터 이용 공학(CAE, Computer-Aided Engineering)에 활용할 수 있는 기술이다. 대부분의 3차원 형상에 대한 기본적인 역설계 과정은 Fig. 2와 같다.

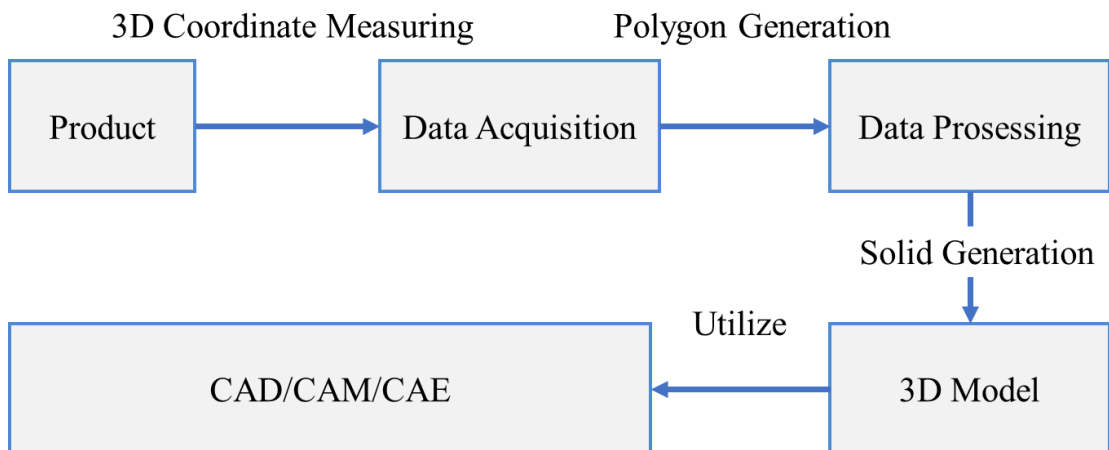


Fig. 2 Reverse engineering process

역설계에 사용되는 3차원 스캐너의 경우, 측정 결과물인 3D 스캔 데이터가 역설계 대상의 물체와 비교하여 정밀하고 정확하게 형상을 재현할 수 있도록 좌표를 취득해 주는 역할을 하게 되는데, 측정 과정에서 역설계 대상의 물체와 물리적 접촉 여부인 측정 방식에 따라 접촉식 측정 방식과 비접촉식 측정 방식으로 분류된다. 접촉식 측정 장비의 예시를 Fig. 3에 나타내었으며 비접촉식 측정 장비는 Fig. 4에 나타내었다.

접촉식 측정 장치는 3차원측정기(CMM, Coordinate-Measuring Machine) 장비가 대표적이며 핵심 부품인 접촉식 프로브라는 센서를 통해 물체의 표면에 접촉하여 3차원의 좌표 점(Point) 데이터를 취득할 수 있으며, 비접촉식 측정 방식에 비해 정밀도가 높고, 색상과 투명도의 제한이 적다. 깊은 홈(Hole)과 같은 비접촉식 광원이 닿지 않는 형상 또한 측정이 가능하다. 하지만 CMM장비는 설치형 장비의 특성에 따라 한번 설치하면 이동이 어렵고 측정 대상물의 크기의 제한이 있다.

비접촉식은 레이저(Laser), X-Ray, 구조광(Structure Light) 등을 사용하여 매우 빠른 속도로 표면을 3차원 점군 데이터(Point Clouds)로 취득할 수 있다. 따라서, 대상물과 물리적 접촉이 없는 반면 비교적 정밀도는 낮지만 신속한 데이터의 획득 속도와 측정물의 크기 제한이 자유롭다는 장점이 있다. 대상물의 색상이나 투명도에 영향이 있을 수 있기에 측정하기 전 표면처리를 하여 측정하는 경우가 있다.

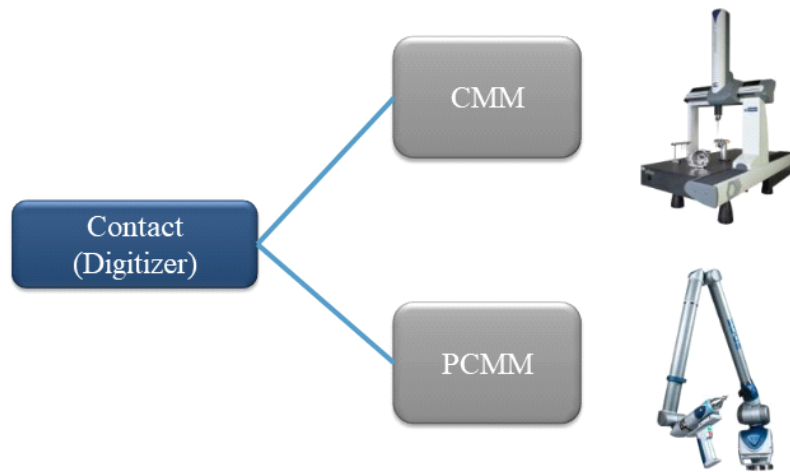


Fig. 3 Contact coordinate measuring machine

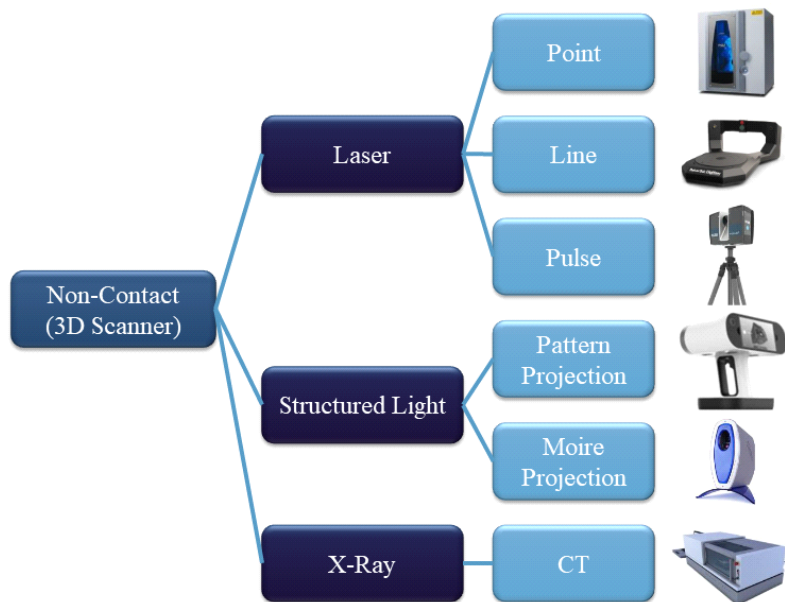


Fig. 4 Non-contact coordinate measuring machine

## 2.2 소형풍력발전기

국내에서는 ‘신재생에너지설비 인증심사기준’에 의거하여 용량 30kW 미만의 풍력설비를 소형 풍력발전시스템으로 정의한다. 소형풍력발전기는 대기 바람으로부터 에너지를 얻어 전기를 생산하는 기기이며 소형풍력터빈(SWT: Small Wind Turbine)으로 통칭한다. 소형풍력터빈의 주요 부품은 블레이드(Blade), 로터(Roter), 발전기(Generator), 나셀(Nacelle) 등으로 구성되어 있으며, 국제규정인 IEC61400-2 기준으로 독립형 또는 계통 연계형으로 구분되고, 국내 규격으로는 KS C IEC61400-2에 의거하여 소형 풍력터빈의 풍력발전시스템(WTGS)의 안전사상, 품질보증 및 기술적 완전성을 취급하고, 설계, 설치, 정비 및 특정 외부조건에서 운전을 포함한 안전성에 관계되는 요구사항을 규정한다. 소형풍력터빈의 종류는 풍력에너지를 회전하는 블레이드 축의 방향에 의해 수직축 소형풍력터빈(VASWT, Vertical Axis Small Wind Turbine)과 수평축 소형풍력터빈(HASWT, Horizontal Axis Small Wind Turbine)으로 분류된다.

소형풍력터빈의 경우 청정 에너지원으로서 제한된 토지 면적을 효율적으로 활용 가능하며 그 실용성도 매우 뛰어나다. 국내 대형풍력터빈의 경우, 기후 및 지형 조건에서 풍력발전의 시스템적인 관점으로 소형풍력터빈과 비교하면 산간 지역으로 둘러 있고 풍력자원의 불확실성과 지역별 이상적인 정격풍속이 다르고, 주변 소음과 시각적 주민 수용성 또한 무시할 수 없기에 대형풍력터빈이 최적인 구역은 해안가를 제외하면 극히 제한적이다. 사면이 바다인 제주도과 같이 대형 풍력터빈은 주로 해상에 위치하는 경우가 대부분이지만, 소형풍력터빈은 국내 풍향과 특성에 맞는 제품을 개발한다면 민간 건물이나 소규모 사유지, 기관, 농업과 같은 대규모 수요가 예상된다.

### 2.3 수평축 소형터빈 블레이드

풍력터빈에서 바람의 에너지를 동력으로 전환하기 위한 가장 중요한 부분이라 할 수 있는 블레이드는 고속으로 회전하며 상당한 원심력이 작용한다. 또한 주로 한 개의 블레이드가 아닌 3개의 블레이드를 제작하여, 허브와 결합한 로터 블레이드를 고려하면 회전하는 흔들림 공차를 관리하기 위한 정밀도와 균형(Balance) 관리가 필수적이다. Fig. 5는 블레이드의 단면 형상인 에어포일을 나타내며 공기의 유입부인 앞쪽 블레이드 선단은 리딩 엣지(Leading Edge)로서 둥근 형상으로 시작하여 부위이며 뒤쪽 트레일링 엣지(Trailing Edge)인 후단으로 가며 날카로운 형상으로 구성되어 있다[3]. 또한 윗, 아래 캠버라인과 중심선, 익현선 블레이드의 테이퍼를 보면 일반적으로 큰 주속비를 얻기 위해 날개 선단부 현의 길이를 작게 설계할 필요가 있는데 Fig. 6과 같이 테이퍼(Taper)가 있는 블레이드와 역 테이퍼, 그리고 블레이드 시작부터 끝까지 현의 길이가 같도록 테이퍼가 없는 블레이드로 구분된다. 각 테이퍼 유무에 따라 장단점이 있지만, 가급적 경량형이며 제작 난이도가 비교적 낮고, 구조적으로도 안정성을 확보하기 위해 대부분 테이퍼형 블레이드로 사용한다[4].

실제 풍력터빈 블레이드의 설계 시, 로터직경과 정격풍속, 목표 출력 등과 같은 설계조건은 설계자의 목적에 따라 가변적일 수 있다. 바람의 에너지를 동력으로 활용하는 데 있어 효율적인 형상을 설계하기 위해서는 목적에 따라 블레이드에 사용되는 에어포일의 선정과 해당 에어포일 현의 길이 및 각도와 같은 세부 조건을 고려하여 결정된다. 로터블레이드에서는 정면으로 받는 풍력에너지뿐만 아니라 회전에 의해 후방에서 받는 힘 또한 에어포일의 각도에 의해 결정되며, 회전하는 로터블레이드가 바람을 받을 수 있는 수평면적은 로터 중심으로부터 반경 방향으로의 에어포일 위치로 결정된다.

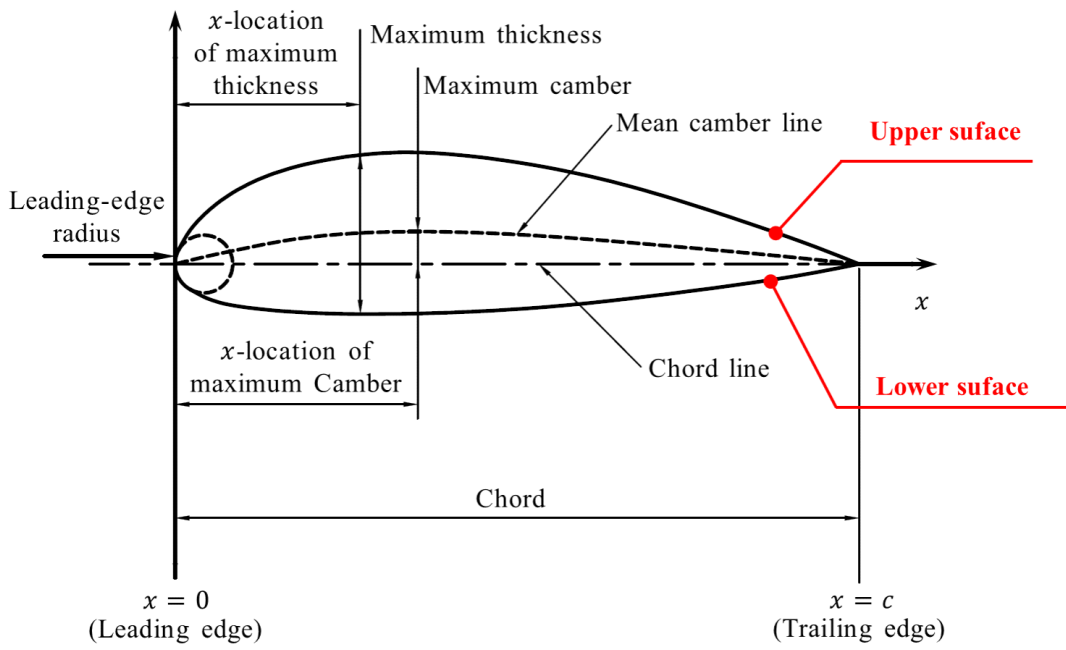


Fig. 5 Airfoil nomenclature[3]

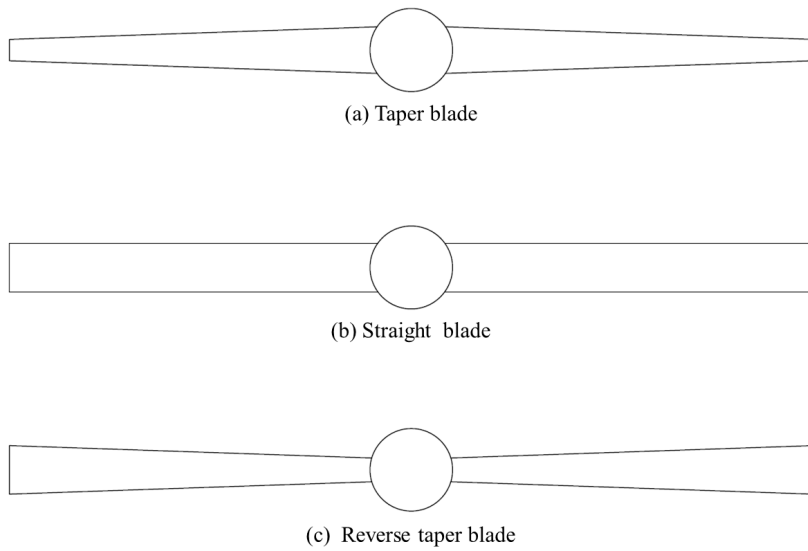


Fig. 6 Comparison of Different taper types for blade[4]



## 2.4 풍력터빈 블레이드의 공기역학적 이론

### 2.4.1 Actuator disk이론

회전하는 로터의 면적을 원판(Disk)의 형태로 가정하여 Fig. 7과 같이, 디스크를 기준으로 상류로부터 하류까지의 유관(Stream tube)이 있는데, 디스크 상류는 디스크의 단면보다 작고, 하류는 디스크보다 면적이 크다. 유관 내 단면적을 지나는 질량 유동량은 밀도  $\rho$ , 단면적  $A$ , 유속  $U$ 에 의해  $\rho AU$ 로 표현된다.

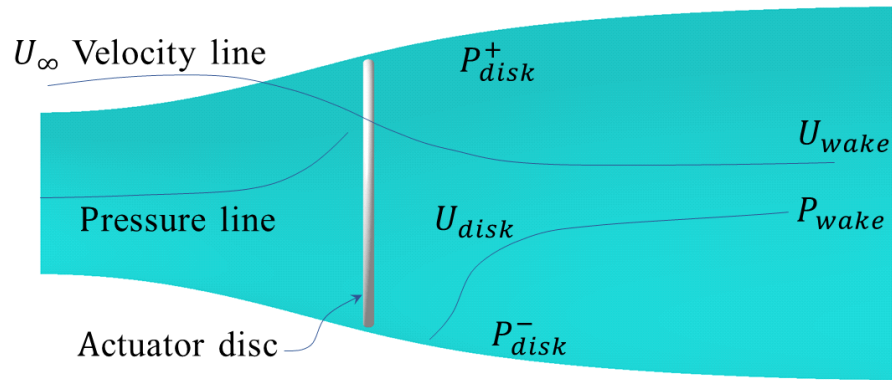


Fig. 7 An energy extracting actuator disk and stream-tube[5]

하지만 유관 내 어떠한 지점의 단면이라도 그 질량유량(mass flow rate)은 일정한 값을 나타내므로 식(1)과 같은 관계가 성립된다[6,7,8]. 일반적으로 디스크에 의해 속도 변화가 발생하는데, 디스크는 상류로부터 들어오는 유속  $U_\infty$ 로부터 로터 평면인 디스크  $U_{disk}$ , 그리고 하류에서  $U_{wake}$ 의 유속을 줄이는 작용을 하게 된다. 이때 로터 단면에 의해 유도되는 흐름 유선방향 속도 성분을  $aU_\infty$ 라하고,  $a$ 를 유입변수, 축 방향 흐름의 유도계수(Axial flow induction factor)라고 한다. 따라서 총 유선방향 속도의 대한 식은 식(2)로 정리된다.

$$\rho A_\infty U_\infty = \rho A_{disk} U_{disk} = \rho A_{wake} U_{wake} \quad (1)$$

$$U_{wake} = U_\infty - aU_\infty \quad (2)$$

#### 2.4.2 운동량 이론과 동력계수

가변적인 디스크 단면을 통과하는 기류의 유속 변화량은  $U_\infty - U_{wake}$ 로 나타내는데, 전체적인 속도 변화량과 질량유량을 곱한 형태이며 관계식은 식(3)과 같다.

$$\text{운동량 변화율} = (U_\infty - U_{wake})\rho A_{disk} U_{disk} \quad (3)$$

디스크 단면을 통과하는 압력변화로부터 발생하는 운동량 변화는 식(4)와 같이 표현되는데, 발생하는 압력의 차이를 확인하기 위해 유관 상류와 하류에 각각 베르누이 방정식(Bernoulli's equation)을 적용하여 유속방향으로의 총에너지는, 정상상태 조건에서 운동에너지, 정압에너지, 위치에너지로 표현하게 된다. 디스크 상류에 베르누이 방정식을 적용하면 식(5)와 같고, 흐름이 수평 높이는 일정하며 비압축성이라는 것을 가정하면 식(5)는 식(6)과 같이 정리된다. 동일한 방법으로 하류에도 적용하면 식(7)과 같다.

$$(P_{disk}^+ - P_{disk}^-)A_{disk} = (U_\infty - U_{wake})\rho A_{disk} U_\infty (1 - a) \quad (4)$$

$$\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2 + P_\infty g h_\infty = \frac{1}{2}\rho_{disk} U_{disk}^2 + P_{disk}^+ + \rho_{disk} g h_{disk} \quad (5)$$

$$\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 + P_\infty = \frac{1}{2}\rho U_{disk}^2 + P_{disk}^+ \quad (6)$$

$$\frac{1}{2}\rho U_{wake}^2 + P_\infty = \frac{1}{2}\rho U_{disk}^2 + P_{disk}^- \quad (7)$$

식(6)과 식(7)을 합하면 식 (8)과 같이 정리되는데, 식(8)을 식(4)에 대입하면 식(9)와 같이 정리되며, 식(10)으로 표현한다. 따라서 축 방향 손실은 상류와 하류에서 각각 절반씩 발생하는 것을 알 수 있다.

$$(P_{disk}^+ - P_{disk}^-) = \frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_{wake}^2) \quad (8)$$

$$\frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_{wake}^2)A_{disk} = (U_{\infty} - U_{wake})\rho A_{disk}U_{\infty}(1-a) \quad (9)$$

$$U_{wake} = (1-2a)U_{\infty} \quad (10)$$

여기서 유동에 의해 디스크에서 발생하는 힘의 변화를 식(4)로부터 구할 수 있으며 식(11)과 같다.

$$F = (P_{disk}^+ - P_{disk}^-)A_{disk} = 2\rho A_{disk}U_{\infty}^2 a(1-a) \quad (11)$$

$F$  는 디스크 단면에 집중되어 발생하는 힘으로서  $F$  에 의해 행한 일률은  $FU_{disk}$ 로 표현한다, 따라서 풍력으로부터 추출되는 동력은 식(12)와 같이 표현할 수 있다.

$$Power = FU_{disk} = 2\rho A_{disk}U_{\infty}^3 a(1-a)^2 \quad (12)$$

따라서 출력계수는 식(13)과 같이 정의할 수 있다.

$$C_p = \frac{Power}{\frac{1}{2}\rho A_{disk}U_{\infty}^3} \quad (13)$$

풍력으로부터 추출할 수 있는 이론적 최대 출력계수를 구하기 위해서는, ‘디스크 단면을 통과하는 풍력의 축 방향 손실은 없다’라는 조건을 가정함으로 식(14)와 같다., 식(14)의 해를 구하면 축 흐름의 유도계수  $a$ 는 식(15)와 같다.

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad (14)$$

$$a = 1, \frac{1}{3} \quad (15)$$

축 흐름 유도계수의 값 1은 물리적으로 의미가 없기에  $a=1/3$ 일 때의 해를 취할 시, 이를 식(14)에 대입하면 식(16)과 같이 정리된다.

$$C_{P,max} = \frac{16}{27} = 0.593 = 59.3\% \quad (16)$$

따라서  $a=1/3$ 일 때, 풍력으로부터 추출할 수 있는 이론적인 최대 출력계수  $C_{P,max}$ 는 0.593이며 Albert Betz에 의해 유도되어진 효율이다. 따라서 이상적인 풍력터빈의 이론적 최대효율 59.3%를 베츠의 한계(Betz limit)라고 한다.

또한, 식(11)은 출력계수  $C_T$ 를 구하기 위해 식(17), 식(18)과 같이 무차원화 될 수 있다.

$$C_T = \frac{Power}{\frac{1}{2}\rho A_{disk} U_{\infty}^2} \quad (17)$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (18)$$

여기서  $a$ 가 0.5 이상일 경우, 식(10)에 의해 후류속도가 0이하의 값을 가지게 되어 운동량이론을 적용할 수 없기 때문에  $a$ 가 0.5 이상인 구간에서는 날개 요소 운동량 이론(BEMT, Blade element momentum theory)에서와 같이 실험적 보정식을 적용할 필요가 있다.

### 2.4.3 블레이드 요소 운동량 이론

기본적인 날개 요소 이론은, 1934년 Glauert에 의해 개발되어 블레이드 설계와 해석에 대한 이론으로 널리 사용되고 있으며[9] 블레이드 상의 요소는 어떠한 간섭도 받지 않으며 블레이드 반경 방향의 흐름과 시간에 따른 유동에 변화가 존재하지 않는 이상적인 정상상태(Steady state)에서 터빈의 회전속도와 각도 등에 따른 성능을 계산하게 된다.

블레이드 현의 길이가  $C$ , 팁 반경  $R$ , 블레이드 개수  $N$  인 로터를 보면, 목표로 하는 성능을 위해 적절히 변경하게 된다. 이때 회전하는 각속도는  $\Omega$ , 유입풍속은  $U_\infty$ 라고 한다. Fig. 8은 블레이드의 국부적인 요소상에 작용하는 힘과 속도를 나타낸다. 블레이드 요소의 접선속도  $\Omega r$ , 후류 접선속도  $\Omega r a'$ , 요소 전체 유동속도의 합은  $(1+a')\Omega r$ 과 같다. Fig. 9는 반경  $r$ 에서 블레이드 미소 단면인 에어포일과 관계되는 모든 힘과 속도 성분의 관계를 나타낸다.

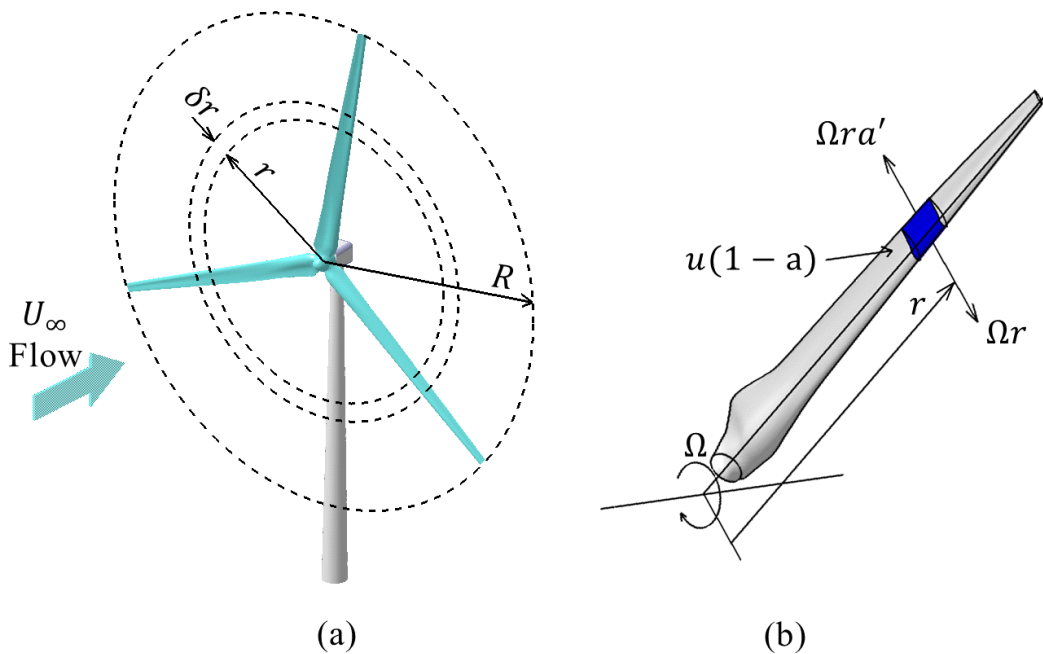
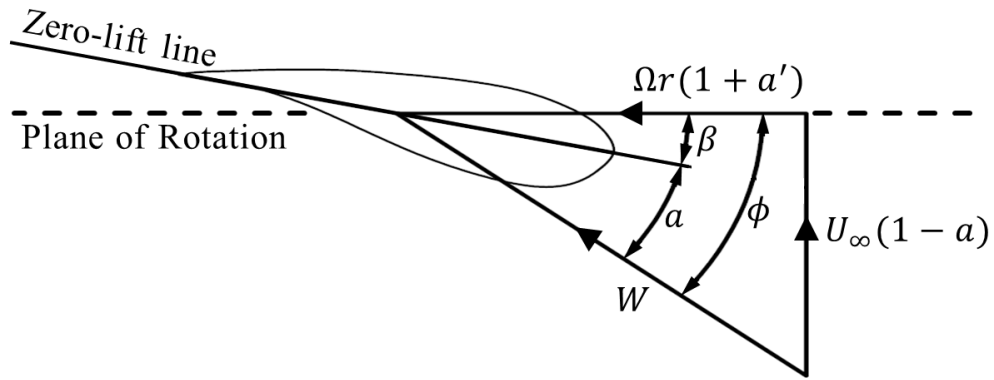
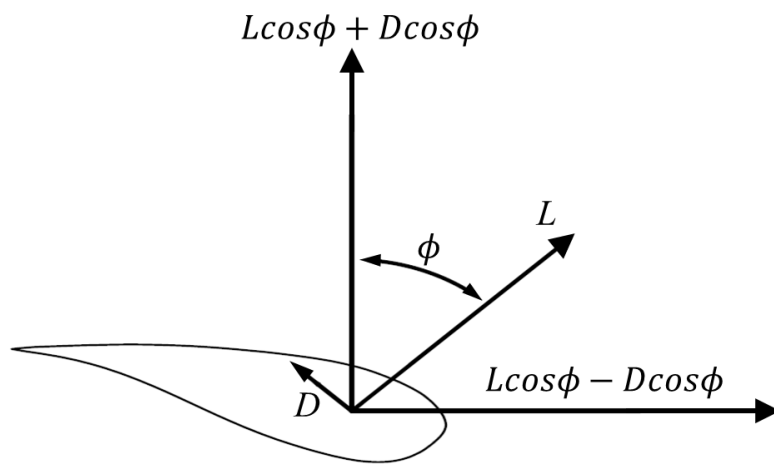


Fig. 8 Blade Element Sweeps Out an Annular Ring



(a) Velocities



(b) Forces

Fig. 9 Blade Element Velocities and Forces

Fig. 9(b)에서 블레이드에 작용하는 합속도를 식(19)와 같이 표현한다.

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2} \quad (19)$$

합속도는 식(20)과 같이 로터 회전면에 대해 각도  $\phi$ 를 갖는다.

$$\sin\phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{W}, \quad \cos\phi = \frac{\Omega r(1+a')}{W} \quad (20)$$

받음각  $a$ 는 식(21)로 정의된다.

$$a = \phi - \beta \quad (21)$$

블레이드 요소 길이인  $\delta r$ 에서 작용하는 양력  $\delta L$ 은 식(22)와 같고, 항력  $\delta D$ 는 식(23)과 같다.

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 C C_L \delta r \quad (22)$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 C C_D \delta r \quad (23)$$

기본적으로 블레이드 반경 방향 요소 사이의 상호작용이 없다고 가정하였으나 실제로는 축 흐름 유도계수의 값이 로터 반경 방향으로 항상 일정하게 유지하지는 않는다. lock at, el.[10]의 실험에 의하면 반경방향에 대한 독립성의 가정은 타당한 것으로 보이며  $N$ 개 블레이드에 대한 축 방향의 공기역학적 힘은 식(24)로 나타낸다.

$$\delta L \cos\phi + \delta D \sin\phi = \frac{1}{2} \rho W^2 N C (C_L \cos\phi + C_D \sin\phi) \delta r \quad (24)$$

요소 면적을 지나는 유동의 축 방향 운동량의 변화율은  $\dot{m}U_\infty$ 이며 통과하는 바람의 크기는  $(U_\infty - U_{wake})$ ,  $U_{wake} = (1 - 2a)U_\infty$ 이므로 국부 회전 면적을 지나는 바람의 축 방향 운동량의 변화율은 식(25)와 같다.

$$\rho U_\infty (1 - a) 2\pi r \delta r \times 2a U_\infty = 4\pi \rho U_\infty^2 a (1 - a) r \delta r \quad (25)$$

후류에서 발생하는 압력강하는 수식이 식(26)과 같으면, 축 방향으로 작용하는 힘은 식(27)과 같다.

$$P_{drop, wake} = 1/2 (2a' \Omega r)^2 \quad (26)$$

$$F = 1/2 (2a' \Omega r)^2 \times 2\pi r \delta r \quad (27)$$

따라서, 식(24)는 축 방향 운동량 변화와 후류 압력강하로 발생하는 힘의 합으로 식(28)로 표현하고, 식(29)로 정리할 수 있다.

$$1/2 \rho W^2 N c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \delta r = 4\pi \rho [U_\infty^2 a (1 - a) + (a' \Omega r)^2] r \delta r \quad (28)$$

$$\frac{W^2}{U_\infty^2} N \frac{C}{R} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) = 8\pi [a (1 - a) + (a' \lambda u)^2] u \quad (29)$$

또한, 축 방향으로 작용하는 힘뿐만 아니라 블레이드 요소 상의 토크인 접선방향으로의 회전력이 발생하는데, 식(30)과 같이 표현되며 각 운동량의 변화율은  $\dot{m}U_{tangential}$ 이므로 식(31)과 같고, 이를 정리하면 식(32)와 같이 표현된다.

$$(\delta L \sin \phi - \delta D \cos \phi) r = 1/2 \rho W^2 N C (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r dr \quad (30)$$

$$\rho U_\infty (1 - a) \Omega r 2a' r 2\pi r \delta r = 4\pi \rho U_\infty \Omega r a' (1 - a) r^2 \delta r \quad (31)$$



$$\frac{W^2}{u_\infty^2} N \frac{c}{R} (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) = 8\pi \lambda u^2 a' (1-a) \quad (32)$$

축 방향 운동량 변화로 유도된 식(29)와 토크로 유도된 식(32)를 치환하여 양력계수와 항력계수에 관계되는 항을 식(33)과 같이 나타내고, 식(34)와 식(35)와 같이 단순화하여 표현할 수 있으며 최종적으로 반경 방향 각각의 미소 단면에 해당하는 2차원 에어포일의 공력 특성으로 축 방향 흐름 유도계수  $a$ 와 회전하는 접선방향 흐름 유도계수  $d$ 를 구하면 토크나 동력 등의 관계 값 계산이 가능하다.

$$C_L \cos \phi + C_D \sin \phi = C_x, \quad C_L \sin \phi - C_D \cos \phi = C_y \quad (33)$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} \left[ C_x - \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} C_y^2 \right] \quad (34)$$

$$\frac{a'}{1-a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi} \quad (35)$$

여기서, 로터블레이드의 회전면적(swept area)중 블레이드의 수평 면적만이 차지하는 비율을 솔리디티(Solidity)라 하며  $\sigma$ 로 표현한다. 성능과 제작 단가에 영향을 미치는 변수이며 식(36)과 같이 나타낸다.

$$\sigma_r = \frac{NC}{2\pi r} = \frac{N}{2\pi r} \frac{C}{R} \quad (36)$$

식(32)로부터 반경 방향 길이  $\delta r$ 을 가진 블레이드 요소의 작용 토크를 식(37)과 같이 계산할 수 있다. 하지만 흐름 유도계수들을 계산할 때 항력에 대한 영향을 무시하였다면, 항력의 관계식을 포함한 식(38)과 같이 수정되어야 한다.

$$\delta Q = 4\pi \rho U_\infty \Omega r a' (1-a) r^2 \delta r \quad (37)$$

$$\delta Q = 4\pi\rho U_\infty \Omega r a' (1-a)r^2 \delta r - \frac{1}{2}\rho W^2 N C_D \cos\phi \delta r \quad (38)$$

따라서 전체 토크는 식(39)로 결정된다.

$$Q = \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 \pi R^3 \lambda \left( \int_0^R u^2 \left( 8a'(1-a)u - \frac{W}{U_\infty} \frac{N D}{R} \right) du \right) \quad (39)$$

로터에서 발생하는 동력  $P$ 는 토크  $Q$ 와 각속도  $\Omega$ 의 곱으로 나타낼 수 있으며, 따라서 출력계수  $C_P$ 는 식(40)으로 계산할 수 있다.

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 \pi R^2} \quad (40)$$

### III. 연구 방법

#### 3.1 풍력터빈 블레이드 역설계 및 해석

본 논문의 역설계 기법 적용 대상은 A-사(社)의 3kW급 소형풍력터빈 로터를 구성하는 블레이드이며 그 형상을 Fig. 10에 나타내었고, 최종적으로 역설계 대상과의 성능을 비교하기 위해 해당 제품에 대한 A-사(社)에서 제공하는 카탈로그의 제원을 Table 1.과 Table 2.에 나타내었다. 역설계 및 해석 과정의 진행은 Fig. 11에 나타내었다. 풍력터빈 블레이드의 CAD/CAM/CAE 공정을 위한 모델을 생성하기 위해, 3D 스캐너로 스캔한 폴리곤메쉬(Polygon Mesh) 데이터의 블레이드 형상을 곡면(Surface), 솔리드(Solid)로 변환하는 후처리를 과정을 거쳐 3D 모델링을 생성하였다. 3D 형상 모델링을 기반으로 CATIA V5를 통해 설계변수 취득을 위한 데이터를 출력 후 2D CAD 데이터를 생성하였고, CATIA V5에서 출력한 데이터를 Auto CAD와 같이 활용하여 설계변수를 분석하였으며, 블레이드의 설겅값을 분석하여 블레이드에서 취득한 설계변수 데이터를 기반으로 Q-Blade 내에서 해석 모델 생성과 성능 분석을 수행하였다.



Fig. 10 A-3kW wind turbine blade

Table 1. Specifications of A-3kW wind turbine generator

Contents		Value
TURBINE	Start wind speed	2.5 [m/s]
	Cut-in wind speed	3.0 [m/s]
	Cut-out wind speed	25 [m/s]
	Survival wind speed	45 [m/s]
ROTOR	Rotor diameter	5.0 [m]
	Rotor speed	280 [RPM]
TOWERS	Free standing tower	9 [m]
	Guyed tower	12 [m]

Table 2. Generator power of A-3kW wind turbine

Wind speed [m/s]	Generator Power [W]
3	60
4	165
5	345
6	620
7	1020
8	1560
9	2260
10	3050

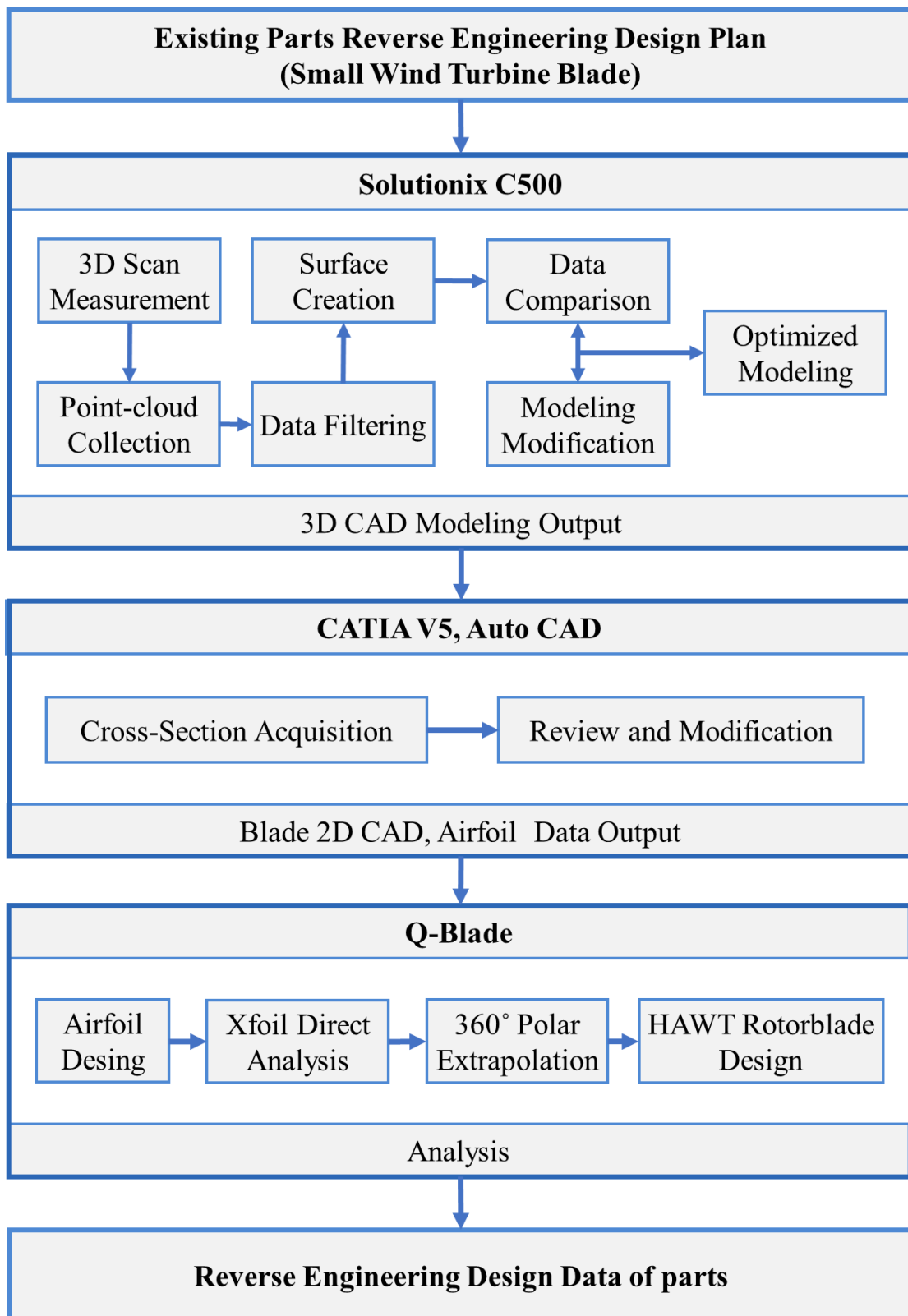


Fig. 11 Reverse engineering design and analysis process

### 3.1.1 Solutionix C500

본 연구에서는 풍력터빈 블레이드의 스캔을 위해 한국생산기술연구원에서 보유한 비접촉식 3D 스캐너인 Solutionix C500를 선정하였으며 Fig. 12에 나타내었고, 사용된 3D 스캐너는 스캔 조건에서 Table 3.과 같이 Level 4 수준의 스캔 영역을 지정할 수 있는 장비이다. 3D 스캐너를 활용하여 블레이드의 보다 정밀한 스캔을 위해 FOV90 모드에서 스캔을 수행하였으며 Solutionix-사(社)에서 제공한 기본적인 제원을 Table 4.에 나타내었다.

사용한 Solutionix 3D 스캐너는 Fig. 13과 같이 이동식 거치대를 사용하여 구간별로 3차원 형상의 점군 데이터(Point Clouds)를 데이터를 획득하였고, 무수히 많은 노이즈와 중복된 데이터를 제거하는 여과(Filtering) 과정과 위치가 다른 데이터의 정합(Registration) 과정을 거쳐 Fig. 14와 같은 STL 파일로 출력하게 되며 최종적으로 풍력터빈 블레이드의 스캔 형상을 확인할 수 있게 된다.

3D 스캐닝으로 취득하여 STL파일로 출력한 데이터를 불러온 형상을 Fig. 15에 나타내었으며, 해당 데이터는 18,572,447개의 폴리곤 메쉬로 구성된 형상인 것을 확인할 수 있었다.

3차원 모델링의 생성은, Mesh 데이터의 형상을 분석하였으며, 평면과 곡면에 대하여 구역을 지정한 Mesh로부터 기준 평면을 우선 추출하여 단면을 생성하였다. 추출한 단면을 참고하여 치수 변경이 가능한 스케치를 생성한 후, 곡선을 투영하여 폴리라인으로 생성하였다. 생성한 단면의 폴리라인과 Mesh 단면의 편차를 분석하는 과정에서, 편차의 허용범위는  $\pm 0.01$  [mm]로 설정하였으며 2차원 편차 분석을 통해 허용된 신뢰도를 기반으로 스케치 모델을 생성하였다. 이러한 스케치를 활용하여 3차원 곡면을 생성하였고, 생성한 곡면들과 스케치를 활용하여 솔리드를 생성하였다.

생성이 완료된 형상에 대해서는, 완성된 솔리드와 서피스를 스캔 데이터와 비교하여 편차를 분석하였으며, 편차의 허용범위는  $\pm 0.01$  [mm]로 설정하였다, 3차

원 솔리드 또한 표면 윤곽 공차의 오차를 줄여 정확도를 높이고, 최종적으로 생성한 형상에서 외부 필렛(Filet)작업을 수행한 후 완성된 솔리드의 정합 과정을 통해 마무리하여 완료된 3차원 풍력터빈 블레이드의 형상을 Fig. 16에 나타내었다. 솔리드(Solid) 모델은, 설계변수 취득과 도면 작성에 활용할 예정이다.



Fig. 12 Solutionix C500

Table 3. Solutionix C500 scan scan parameters[11,12]

Contents	Level			
	1	2	3	4
Scan area	FOV90	FOV175	FOV350	FOV500
Area size(mm)	68 ×56 ×30	136×111×60	264×218×120	385×312×210
Point-to-point distance (mm)	0.028	0.056	0.11	0.157

Table 4. Specifications of Solutionix C500[11,12]

Contents	Value
Cameras	2.0, 5.0MP Twin Camera
Light Source	Blue LED 30,000 hours
3D Scanning principle	Phase shifting optical triangulation
3D Scanning area	90,175,350,500mm Diagonal select
Size (W x H x D)	315 × 270 × 80 [mm]
3D point accuracy up to	0.01 [mm]
Weight	2.3Kg
Interface	USB 3.0 B type
Power	AC 100 ~ 240V / 47/63 [Hz]
Output data format	STL



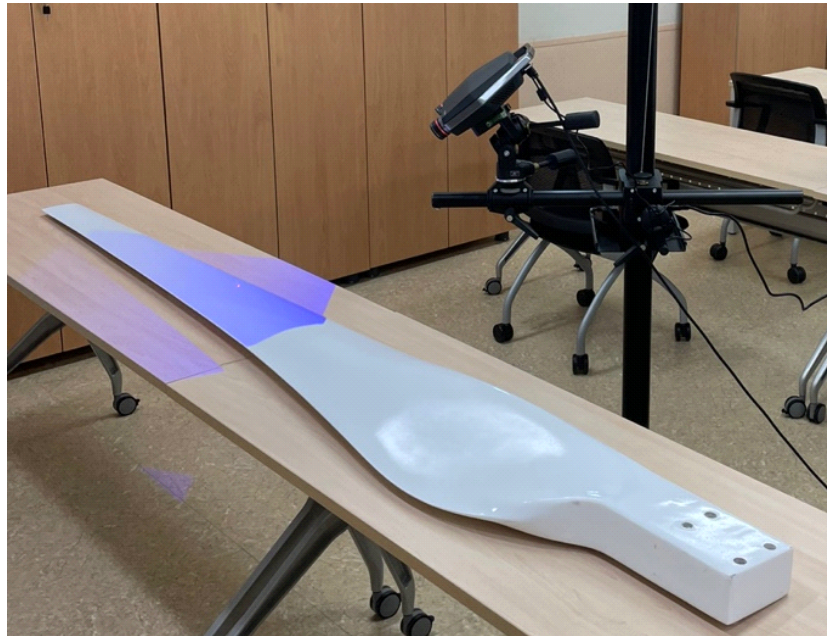


Fig. 13 Blade measurement setup used Solutionix C500

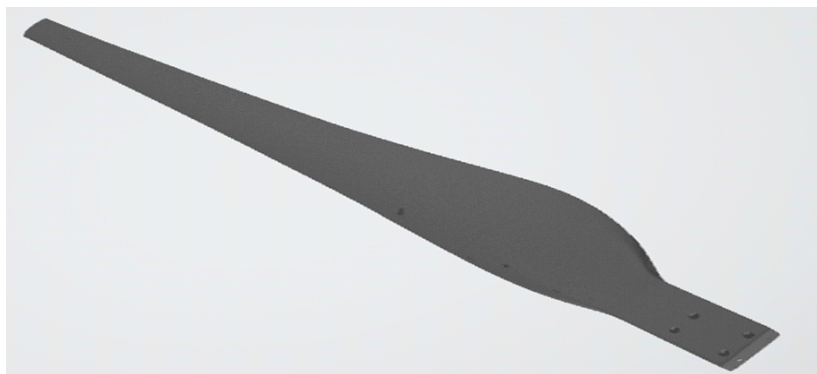


Fig. 14 3D scan results of wind turbine blade

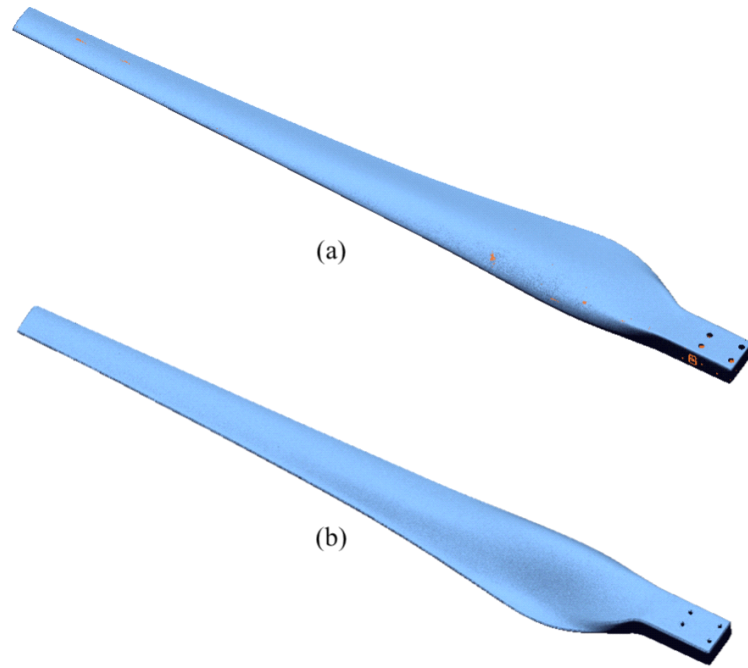


Fig. 15 Opaque polygon mesh of wind turbine blade

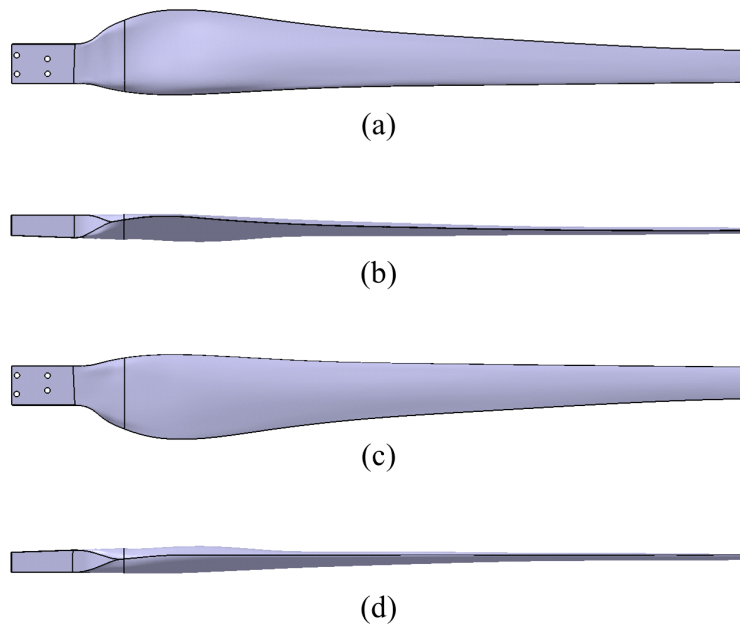


Fig. 16 Solid CAD data after post-processing

### 3.1.2 에어포일 취득 및 CAD 작성

본 연구에서는 에어포일 취득을 위해, 설계부터 엔지니어링 및 제조분야에 다양하게 활용되고 있는 소프트웨어인 CATIA V5와 Auto CAD가 사용되었다. 에어포일 형상 데이터는, X-Y평면의 좌표 점(Point)으로 표현할 수 있으며 현의 길이인 코드(Chord)를 기준으로 무차원수로 표현할 수도 있다.

CATIA V5 작업 환경에서는, 풍력터빈 블레이드의 중심으로부터 온전한 에어포일을 가진 단면을 Fig. 17과 같이 3차원 요소 투영(project 3d elements) 기능을 활용하여 형상을 취득하였고, 직사각형(Rectangle)으로 시작하는 로트부위부터 에어포일 블레이드가 시작하기 전까지는 형상 그대로를 투영하였다.

이후 에어포일을 데이터로 출력하기 위해 Fig. 18과 같이 각 에어포일 코드 길이의 방향에서 수직한 직선을 오프셋(Offset) 하여 에어포일과 교차하는 위치에 60개 정도의 점을 생성하였고, 생성한 점 데이터를 Auto CAD에서 편집할 수 있도록 제도(Drafting) 기능으로 출력하였다.

Auto CAD 작업 환경에서, 현의 길이가 수평인 에어포일의 좌표 데이터를 생성하기 위해 Fig. 19와 같이 에어포일 양쪽 끝 단을 수평으로 정렬하여 에어포일의 길이, 각도, 중심과 같은 설계값을 취득하였으며, Fig. 20과 같이 Auto CAD의 데이터 추출(Data extraction)기능을 사용하여 에어포일의 상부(Upper surface) 좌표와 하부(Under surface) 좌표를 구분하여 출력한 후 에어포일 Data 파일로 생성하였다.

CAD 도면은 CATIA V5에서 작성하였다. 제조공정에서 설계자의 설계 목적과 공정 지시를 정확하게 전달하기 위해서는, 치수 데이터를 기재한 2D 도면 또한 필수적이다. 로터의 중심으로부터 반경 방향으로 취득한 에어포일 단면 구간의 거리를 확인할 수 있고, 취득한 에어포일 단면을 기준으로 단면도를 표시하였으며 해당 단면도에는 에어포일의 종류, 비틀림 각도(Angle)와 길이(Chord)를 확인할 수 있도록 제도(Drafting) 기능에서 최종 2D CAD 도면을 작성하였다.

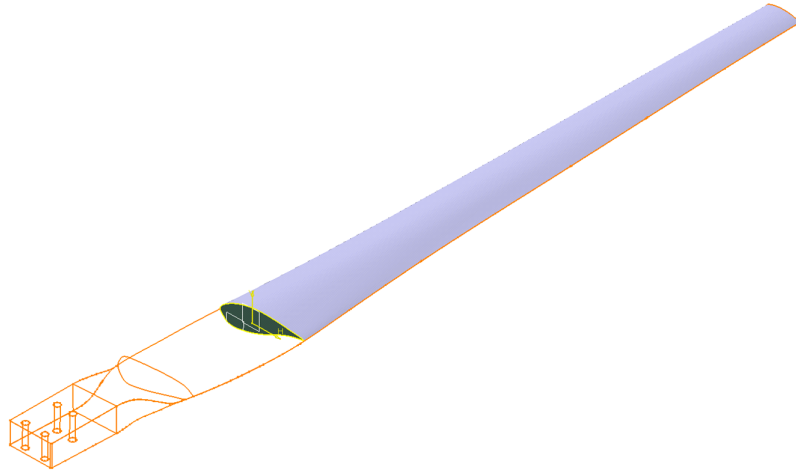


Fig. 17 The projected airfoil of cross-section of blade

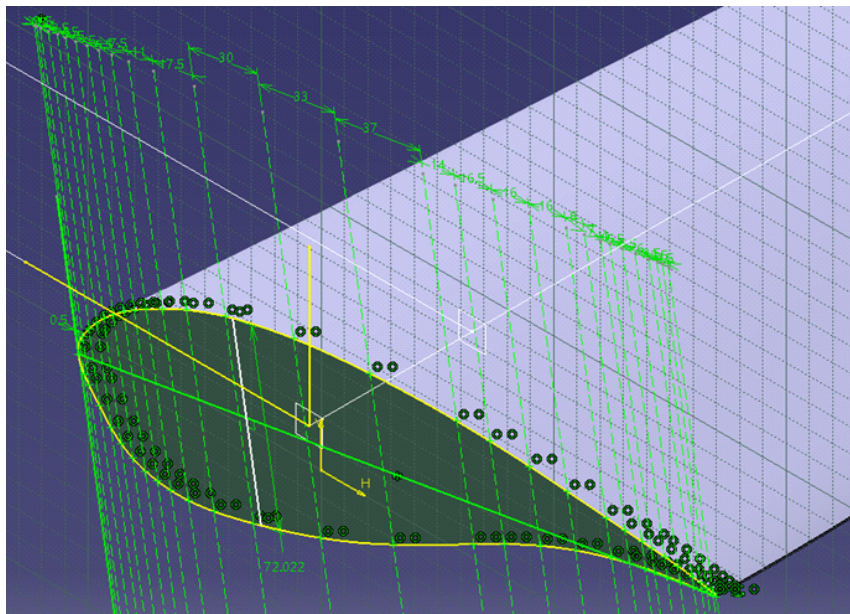


Fig. 18 Acquire airfoil coordinates

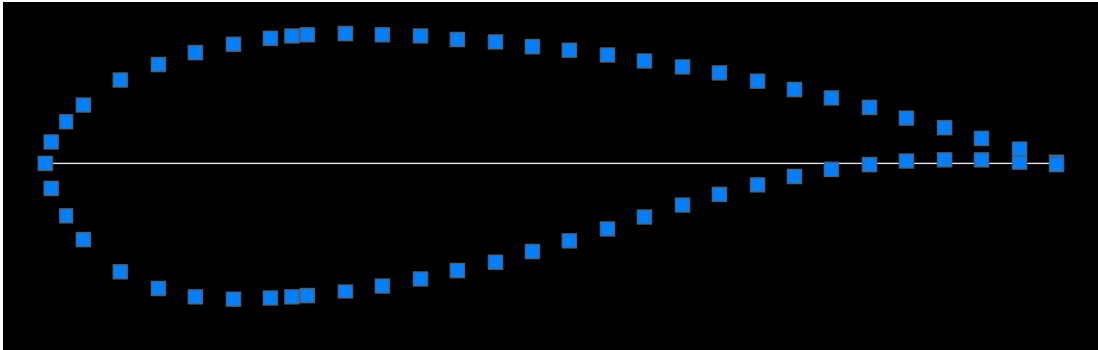


Fig. 19 Point coordinate selection using AutoCAD

**A** 데이터 추출 - 데이터 재정의(5/8페이지) \_ □ ×

이 뷰에서 열 순서를 바꾸고 정렬하고, 결과를 필터하고, 공식 열을 추가하고, 외부 데이터 링크를 작성할 수 있습니다.

계수	이름	위치 X ▲	위치 Y
1	점	0.00000000	0.00000000
1	점	1.58163200	-7.10017198
1	점	1.58163469	5.88940819
1	점	5.68877814	11.63156617
1	점	5.68880229	-14.84116068
1	점	10.46287858	-21.47807214
1	점	10.46288884	16.32594271
1	점	20.92571449	-30.50769899
1	점	20.92573090	23.31115471
1	점	31.38858318	27.59732166
1	점	31.38858796	-35.13339886
1	점	41.85142466	30.76468706
1	점	41.85143581	-37.39948947
1	점	52.31426823	-38.12879173

동일 행 결합(I) 외부 데이터 링크(L)...  
 계수 열 표시(O) 열 정렬 옵션(S)...  
 이름 열 표시(A) 전체 미리보기(F)...

< 뒤로(B) 다음(N) > 취소(C)

Fig. 20 Point coordinate extraction using AutoCAD

### 3.1.3 역설계 블레이드의 공력해석

본 연구에서는 오픈소스 코드 중 하나인 Q-Blade[13]를 사용하여 블레이드의 공력 특성과 터빈의 출력에 대한 해석을 수행하였다. Q-Blade는 기존에 명령식 인터페이스와 달리 Fig. 21과 같이 친화적인 사용자 인터페이스(GUI)로 구성되어 있기에 진행 과정이 효율적이며 직관적인 결과를 얻을 수 있다.

또한 C++ 언어를 사용한 BEM 코드로 사용되고 있으며 Q-Blade의 장점 중 하나는 Marten et al.[14,15]에 의해 Fig. 22과 같이 XFOIL과 Q-Blade를 통합했다는 것이다. XFOIL은 포텐셜 유동 이론(potential flow theory)을 기반으로 MIT에 Mark et al.[16]의해 개발되었으며, 전 세계적으로 에어포일 해석과 관련한 연구에 광범위하게 활용되고 있다.

풍력터빈의 특성을 해석하기 위해 주로 사용되는 수학적 모델은 대부분 BEM 이론을 기반으로 수행되는데 Q-Blade는 사용자 인터페이스(GUI)에서 신속한 에어포일 설계, 보외법(Extrapolation)을 통한 360° 받음각 성능 추정과 블레이드의 형상을 구현할 수 있다.

특히 BEM 기법은 블레이드의 구간별 2차원 단면의 유동 결과를 통해 블레이드 전체에 대한 공력을 예측하는 방법이며, 단면에 정의된 2차원 에어포일의 공력 데이터에 의존하여 성능해석을 수행하기 때문에 하중 해석 과정에서 블레이드 흡입면에 발생하는 3차원 유동에 대한 영향은 고려하기 어렵다는 단점과 외부 입력데이터의 신뢰성에 따라 예측정확도가 크게 달라질 수 있지만, 설계를 검토하는 중에 성능해석의 결과와 그 Feed back을 신속하게 수행할 수 있으며 기회비용을 줄일 수 있다는 장점과 주속비가 3 이상일 경우, 성능해석의 상당히 높은 수준의 정확도를 나타내기 때문에 설계단계에서 다양하게 적용되어 많이 사용되는 기법이다. 실제 풍력터빈이 작동하고 있는 조건과 유사하도록 후류(Wake)에 의한 손실 계수나 환경에 따른 회전속도 조건에 따른 레이놀즈수 변화를 고려한다면, 더 높은 신뢰도의 결과를 얻을 수 있다[17,18,19].

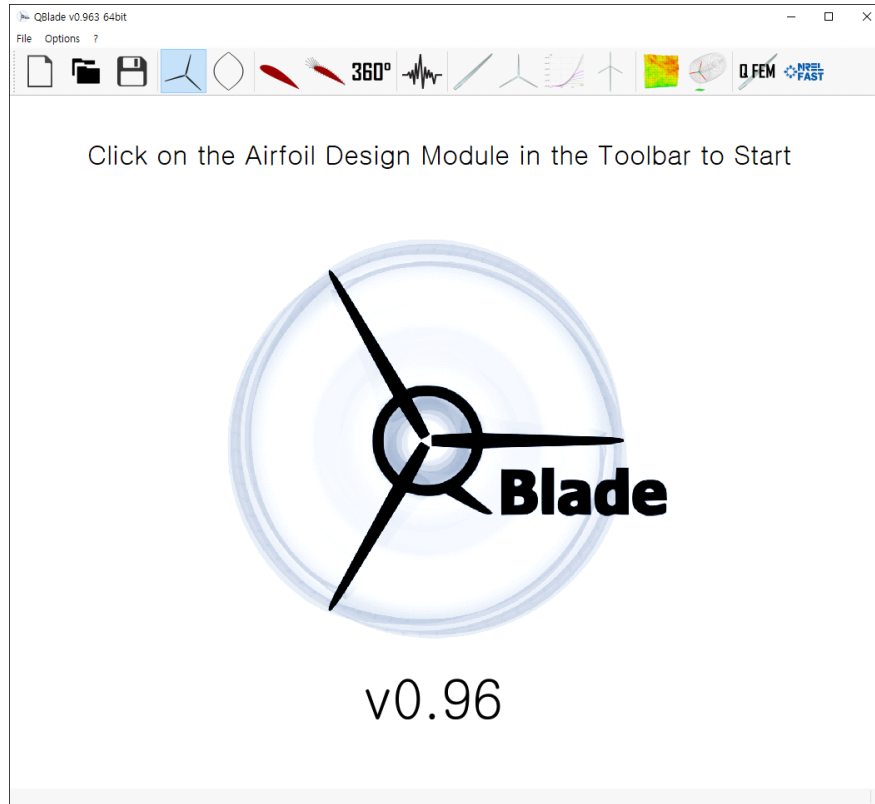


Fig. 21 Graphical user interface of Q-Blade v0.96[13]

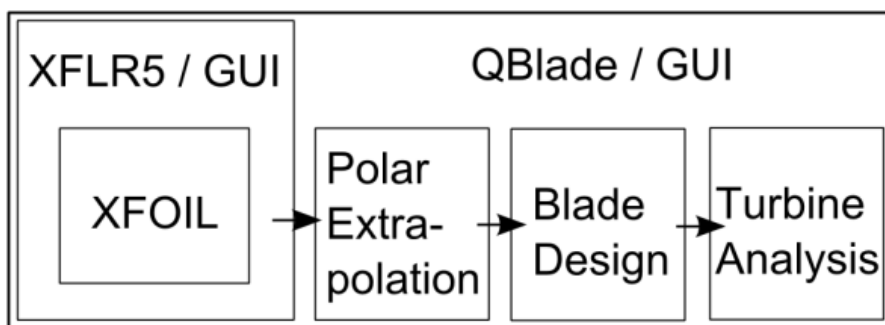


Fig. 22 Software modules inside Q-Blade[14,15]

### 3.1.4 해석 조건 및 가정

역설계 풍력터빈 성능에 대한 해석을 수행하기 전, 에어포일 단위의 공력 특성을 계산하여 블레이드 형상을 구현한 후에 3개 블레이드로 구성된 로터블레이드 단위의 해석을 수행하였다.

이후 일정 범위 조건에서의 성능을 예측하기 위한 Multi parameter BEM simulation을 수행하게 되는데, 분석 범위는 풍속 1 [m/s]에서부터 12 [m/s]까지  $\Delta 1$  [m/s]간격으로, 주속비는 1에서 12까지 TSR  $\Delta 0.1$  간격으로 설정하였다. 각 결과값을 기반으로 HAWT Simulation에서 회전속도와 같은 해석 조건을 추가로 설정하여 최종 출력을 예측할 수 있는 풍력터빈 단위의 해석을 수행하게 된다.

회전속도(Roter speed)는 역설계 대상 제품의 제조사인 A-사(社)에서 제공한 데이터를 기반으로 Table 5.와 같이 설정하였다.

풍력터빈의 해석을 수행하기 위해 BEM 기법을 기반으로 팁 손실(Tip Loss), 루트 손실(Root Loss)과 같이 손실 보정을 적용하였고, 3차원 보정(3D Correction), 레이놀즈 드래그 계수 보정(Reynolds Drag Correction) 및 포일 보간(Foil Interpolation)을 설정하였다. 최적화 수렴의 최대 입계값(Max Epsilon for Convergence)은 0.001로 설정하였고, Relax Factor가 0.35, 공기 밀도(Rho)는  $1.225 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ , 동점성계수(Viscosity)를  $0.00001647 \text{ [m}^2\text{/s]}$ 로 설정하였다.

미수렴 시 최대 반복 횟수를 100회로 설정하였고, 풍력터빈에 대한 컷인(Cut-In) 풍속과 컷아웃(Cut-Out) 풍속은  $3 \text{ [m/s]}$ 와  $25 \text{ [m/s]}$ 로 설정하였다.

Weibull Settings는  $k=2$ 와  $A=9$ 로 고정하였으며, 분석 범위는 풍속 1 [m/s]에서부터 12 [m/s]까지  $\Delta 0.1$  [m/s] 간격으로 해석을 수행하여 A-사(社)의 풍력터빈의 성능과 비교하였다.

역설계를 기반으로 획득한 설계 데이터를 기준으로, 미국 국립재생에너지연구



소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)의 S822와 S823 에어포일을 사용하여 블레이드 설계의 설정값 중 하나인 에어포일에 대한 설계변경을 수행하였으며, 2개의 블레이드의 모델을 추가로 생성하였다. 설계변경 블레이드는, 역설계 블레이드를 해석한 조건과 동일한 조건으로 해석을 수행하였다.

또한, 블레이드 해석 시 출력계수를 확인할 수 있는데, 역설계 블레이드의 최적의 회전속도를 도출하기 위해 Q-Blade 내에 있는 HAWT Transmission Optimal 기능을 사용하여 역설계 블레이드의 계수가 가장 높을 때의 주속비를 유지할 수 있는 풍속 대비 최적의 회전속도를 도출하였고, 해당 데이터를 기반으로 풍력터빈의 해석을 재수행하였다.

Table 5. The RPM according to the wind speed at A-3kW wind turbine

Wind speed [m/s]	Roter speed [RPM]
3	20.0
4	50.0
5	100.0
6	165.0
7	193.11
8	220.69
9	248.28
10	275.87
11	303.46
12	331.04

## IV. 결과 및 토의

### 4.1 역설계 블레이드 설계변수 분석 및 CAD 작성

블레이드의 반경 방향 구간에서는, 에어포일 단면을 추가할수록 Fig. 23과 같이 취득한 단면으로 이루어진 곡면의 표면 형상이 역설계 블레이드의 윤곽과 일치하게 되는데, 편차 분석(Deviation analysis)기능을 이용하여 Fig. 24과 같이 취득한 에어포일 단면으로 생성한 블레이드 곡면의 표면 윤곽과, 역설계 블레이드 모델과의 표면 윤곽의 오차가 큰 구간마다 단면을 추가하여 평균  $\pm 0.005$  [mm] 누적 공차 0.01 [mm] 이하일 때까지 10개의 역설계 에어포일 단면을 생성하였고, 그 구간을 Fig. 25에 나타내었다.

블레이드를 정면에서 보았을 때 에어포일 현의 길이 차이와 현이 위치한 중심에 따라 외관상 굴곡의 기울기가 다른데, 블레이드의 반경을 기준으로 50% 이후의 굴곡과 비교하여 20~50%의 굴곡의 기울기가 더 크기 때문에 비교적 많은 단면을 추가하게 되었다.

각각의 구간마다 추출한 에어포일에 대해 Fig. 26과 같이 설계변수를 분석하였으며, 고유 길이 그대로의 좌표를 Table 6.에, 무차원수의 좌표를 Table 7.에 나타내었다. 총 10개의 에어포일을 분석하였다.

에어포일 데이터 파일은 기본적으로 무차원수 좌표로 이루어져 있으며 좌표의 시작점은 에어포일 후단 끝에서 반시계 방향으로 연속적인 점 좌표를 이루며, 다시 후단 끝 시작점으로 돌아오며 에어포일의 형상을 구성한다.

역설계 블레이드의 설계변수를 정리한 테이블을 최종적으로 Table 8.에 나타내었는데, 직경 5 [m] 사양의 블레이드는 반경 0.3 [m]까지 조립부이며 이후 0.53 [m]까지 직사각형 단면과 에어포일 단면 사이의 형상, 0.53 [m]부터 2.5 [m]까지 온전한 에어포일 블레이드의 형상으로 이루어져 있으며, 에어포일의 받음각과 연관되는 비틀림 각도는 반경 0.65 [m]에서 10.51°까지 커지다가 블레이드 끝으로 갈수록 3.23°까지 작아지는 것을 확인할 수 있다.

이처럼 분석한 최종 CAD 도면을 Fig. 27~Fig. 29에 나타내었다. 역설계한 블레이드의 3차원 형상을 Fig. 27과 같이 확인할 수 있으며, Fig. 28에서는, 블레이드와 허브의 조립 부위는, 대형터빈과 달리 원형이 아닌 사각으로 되어 있는데, 이는 정면에서 나사 규격 M18 볼트 4개로 조립하는 방식임을 알 수 있다. Fig. 29를 확인하여 로터 회전축 중심으로부터 반경 방향 각각의 거리는 530, 580, 650, 750, 800, 950, 1250, 1600, 2100, 2500 [mm]이며 단면에서 어떠한 에어포일을 사용했는지와 에어포일 현의 크기와 각도를 확인할 수 있다.

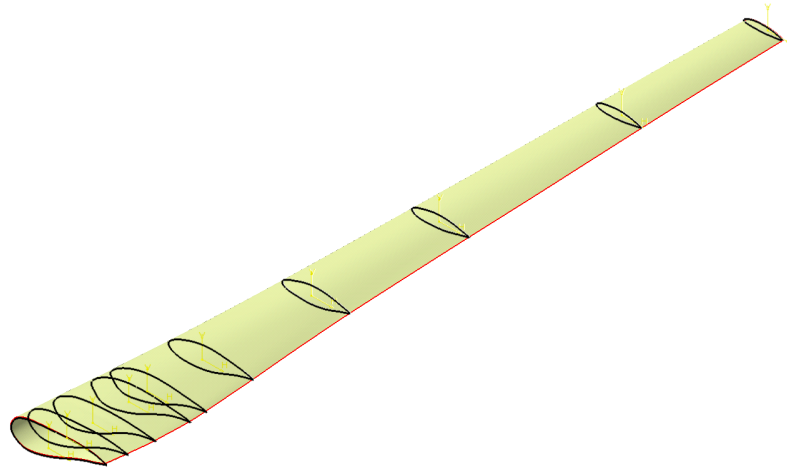


Fig. 23 Create a blade surface

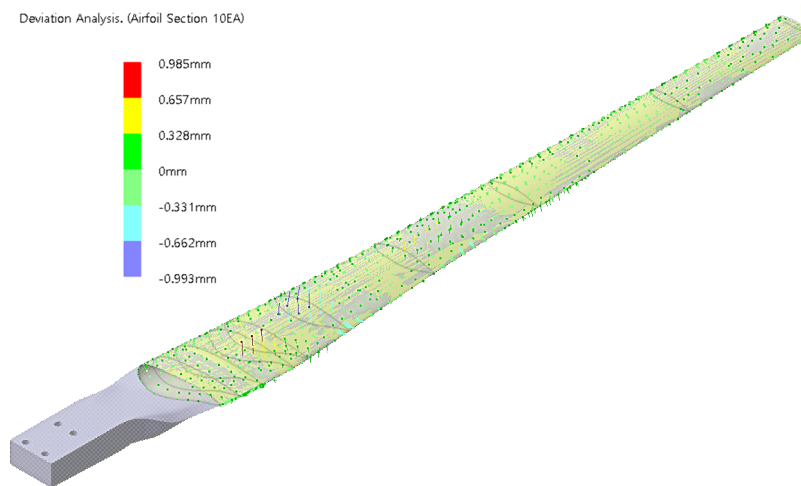


Fig. 24 Deviation analysis of the generated surface

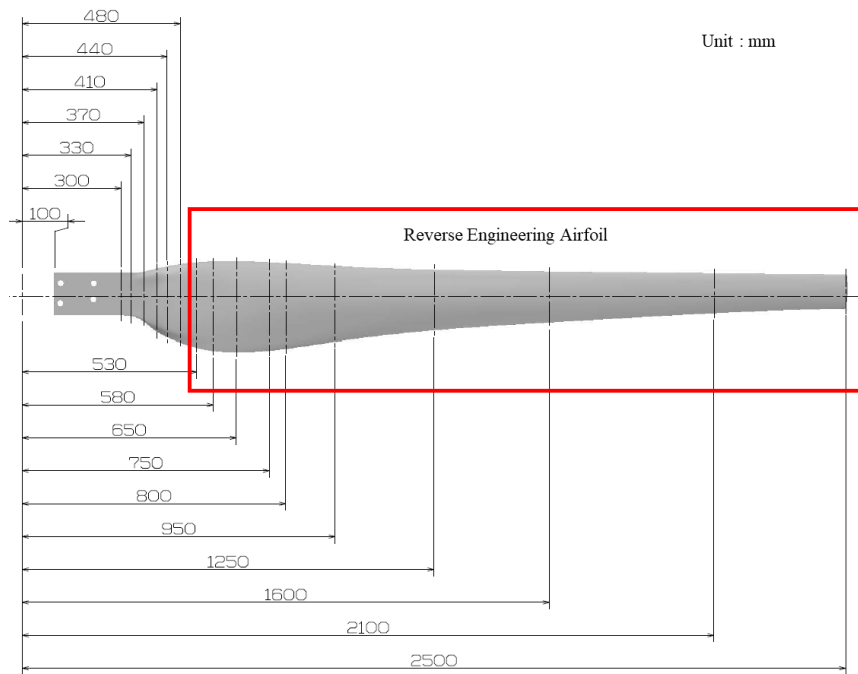


Fig. 25 Radial length of reverse engineered airfoil section



Fig. 26 Acquisition of design variables

Table 6. REA coordinates(Radius 650mm)

X 좌표(mm)	Y좌표(mm)	
	upper surface	under surface
0	0	0
1.581632	5.88940819	-7.10017198
5.688802	11.63156617	-14.84116068
10.46288	16.32594271	-21.47807214
20.92571	23.31115471	-30.50769899
31.38859	27.59732166	-35.13339886
41.85144	30.76468706	-37.39948947
52.31427	33.22095518	-38.12879173
62.77713	34.91201323	-37.91311302
68.87921	35.52811158	-37.50582441
73.24012	35.8115164	-37.12261334
83.70282	36.05664071	-35.93088654
94.16569	35.86309479	-34.38991933
104.6285	35.3626333	-32.49324788
115.0914	34.63410345	-30.23250735
125.5543	33.71136579	-27.63184925
136.0171	32.62303736	-24.74078965
146.4799	31.39897439	-21.63429145
156.9428	30.06094004	-18.4023057
167.4057	28.57807893	-15.12512882
177.8685	26.90919867	-11.90236089
188.3314	25.02751936	-8.86520533
198.7942	22.92962906	-6.1340262
209.2571	20.61849735	-3.7888949
219.7199	18.10438236	-1.89257408
230.1828	15.4261914	-0.47416983
240.6456	12.63569946	0.43152712
251.1085	9.78549505	0.7989315
261.5713	6.88224091	0.69357064
272.0342	3.76696011	0.27058601
282.497	0	0

Table 7. Dimensionless number REA coordinates

X 좌표	Y좌표	
	Upper surface	Under surface
0.000000	0.000000	0.000000
0.005599	0.020848	-0.025134
0.020138	0.041174	-0.052536
0.037037	0.057792	-0.076029
0.074074	0.082518	-0.107993
0.111111	0.097691	-0.124367
0.148148	0.108903	-0.132389
0.185185	0.117598	-0.134971
0.222222	0.123584	-0.134207
0.243823	0.125765	-0.132765
0.259259	0.126768	-0.131409
0.296296	0.127635	-0.127190
0.333333	0.126950	-0.121735
0.370370	0.125179	-0.115022
0.407407	0.122600	-0.107019
0.444444	0.119334	-0.097813
0.481481	0.115481	-0.087579
0.518518	0.111148	-0.076582
0.555556	0.106412	-0.065142
0.592593	0.101162	-0.053541
0.629630	0.095255	-0.042133
0.666667	0.088594	-0.031382
0.703704	0.081168	-0.021714
0.740741	0.072987	-0.013412
0.777778	0.064087	-0.006699
0.814815	0.054607	-0.001678
0.851852	0.044729	0.001528
0.888889	0.034639	0.002828
0.925926	0.024362	0.002455
0.962963	0.013335	0.000958
1.000000	0.000000	0.000000

Table 8. REA blade design data

Section	Radius (mm)	Chard (mm)	Twist ( ° )	X Offset (mm)	Z Offset (mm)	Twist Canter (%)
Rectangle	100	148.809	0	0	-3.491	50.00%
	300	148.809	0	0	-3.491	50.00%
Between Rectangle and REA	330	150.253	0	0	-3.741	49.27%
	370	164.954	0	0	-8.183	44.39%
	410	197.137	0	0	-10.948	40.27%
	440	217.417	0	0	-4.913	39.35%
	480	240.747	0	0	-1.348	38.37%
REA01	530	263.176	9.37	0.000	-1.531	37.35%
REA02	580	276.932	10.43	0.000	-2.949	36.71%
REA03	650	282.497	10.51	0.000	-4.513	36.30%
REA04	750	272.958	9.18	0.000	-7.113	36.19%
REA05	800	264.214	8.60	0.000	-8.408	36.35%
REA06	950	233.414	7.37	0.000	-11.305	37.40%
REA07	1250	186.708	5.66	0.000	-14.467	40.35%
REA08	1600	156.885	4.29	0.000	-17.451	44.45%
REA09	2100	122.694	2.92	0.000	-19.790	52.37%
REA10	2500	104.407	3.23	0.000	-19.426	57.81%



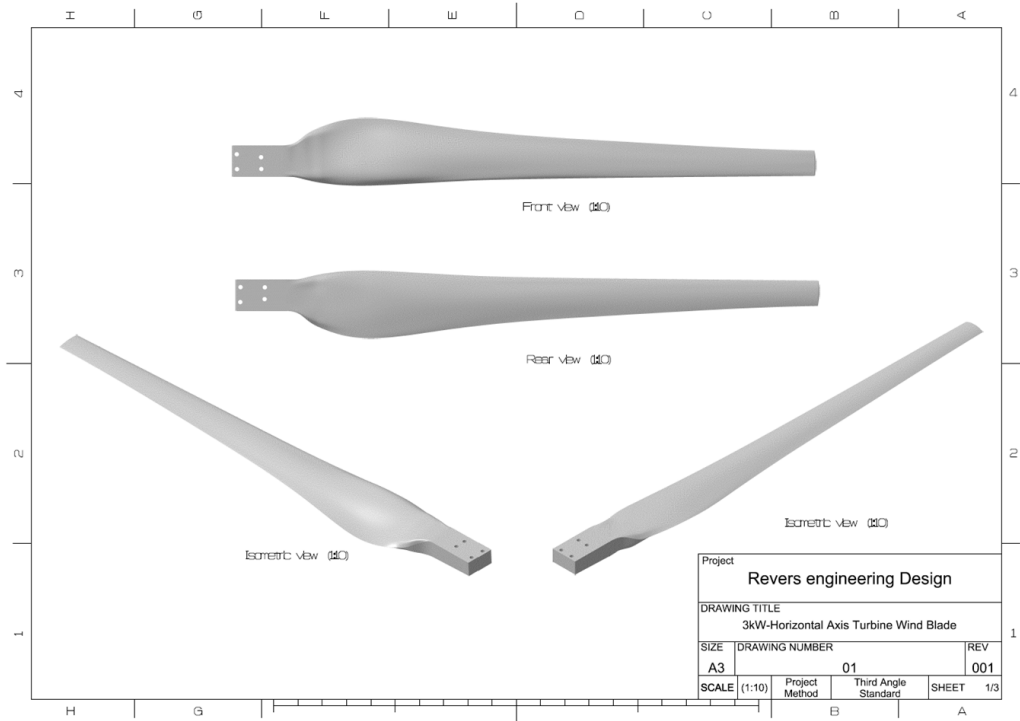


Fig. 27 Reverse design blade drawing 1/3

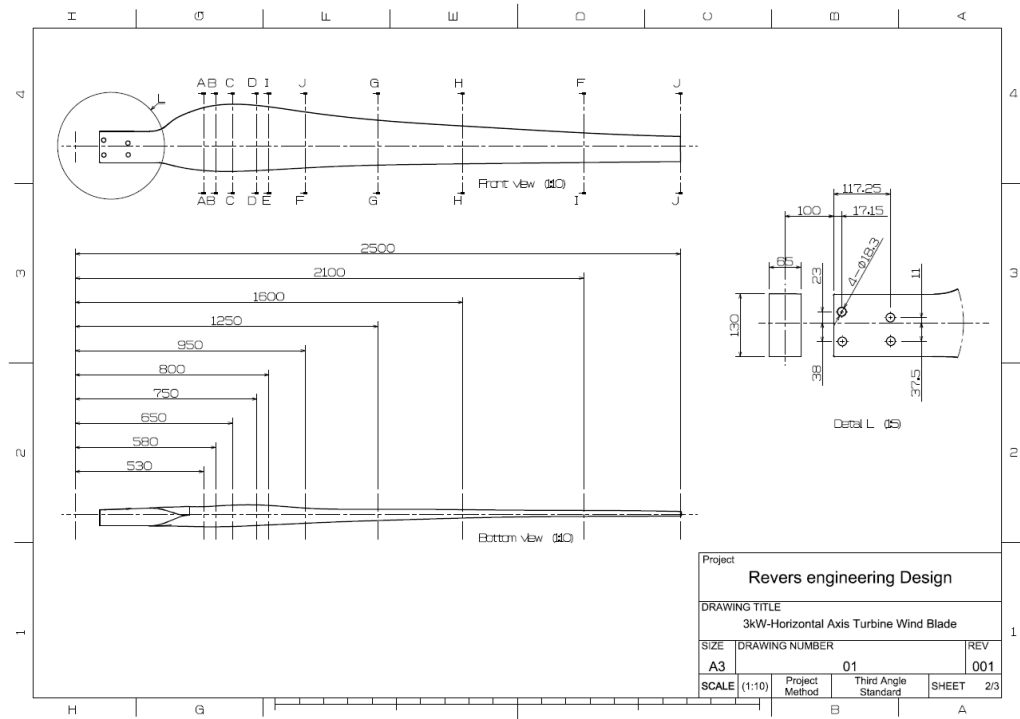


Fig. 28 Reverse design blade drawing 2/3

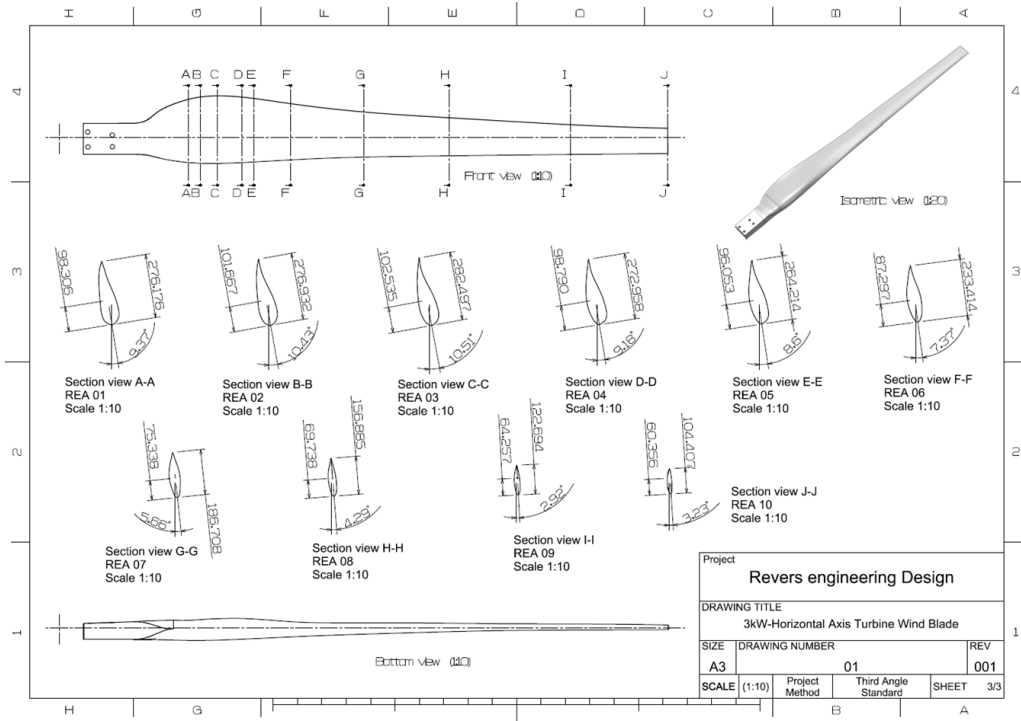


Fig. 29 Reverse design blade drawing 3/3

## 4.2 역설계 에어포일 분석

역설계를 기반으로 한 블레이드의 공력해석을 위해, 블레이드를 구성하고 있는 구간별 에어포일 REA 10개에 대한 데이터를 Import Foil 기능으로 Fig. 30과 같이 가져왔으며, 이후 XFOIL Direct Analysis에서 받음각에 따른 공기역학적 계수를 해석하였다.

XFOIL Direct Analysis에서 풍력터빈의 성능 분석을 수행하기 위해 2차원 에어포일의 압력 분포와 레이놀즈수, 마하수에 따른 공기역학적 계수인 받음각(AoA, Angle of Attack)에 따른 양력계수, 항력계수, 양항비에 대한 해석을 수행하며, Fig. 31과 같이 에어포일 표면 위로 흐르는 공기의 경계층과 Fig. 32와 같이 에어포일 주위의 압력 분포를 직관적으로 확인할 수 있다. 이렇게 수행된 결과는  $360^\circ$  극성 외삽법(Polar Extrapolation to 360)에 활용된다. XFOIL Direct Analysis에서는 받음각  $-10^\circ$ 에서  $20^\circ$ 까지  $0.1^\circ$ 의 간격으로 수행하였고, Circular Foil을 제외한 10개의 구간별 에어포일 형상에 대한 해석을 Fig. 33과 같이 확인하였다.

풍력터빈 블레이드는, 각각 블레이드 반경 방향의 거리에 있는 에어포일의 위치에서, 풍속과 블레이드 회전속도의 향으로 받음각이 결정된다. 따라서 에어포일의 공력 특성으로 대표되는 양력계수와 항력계수의 받음각 변화에 대한 변화량을 구하면, 블레이드에 가해지는 공력에서 작용하는 힘을 계산할 수 있다.

따라서 BEM 과정에서 해석 결과를 수립하기 위해서는  $\pm 180^\circ$  범위의 에어포일 받음각 데이터가 요구되는데, 극성 외삽법(Polar Extrapolation)[20]은 XFOIL 알고리즘으로 얻은  $-10^\circ$ 에서  $20^\circ$ 까지의 공력데이터를 기준으로 모든 받음각인  $\pm 180^\circ$  범위에서의 공력특성 데이터가 유효하도록 확장하여 구성하는 과정이며, 극성 보외법이라고도 부른다. 역설계 에어포일 10개에 대해 필요한  $\pm 180^\circ$ 의 받음각 데이터를 Fig. 34와 같이 확인하였다.

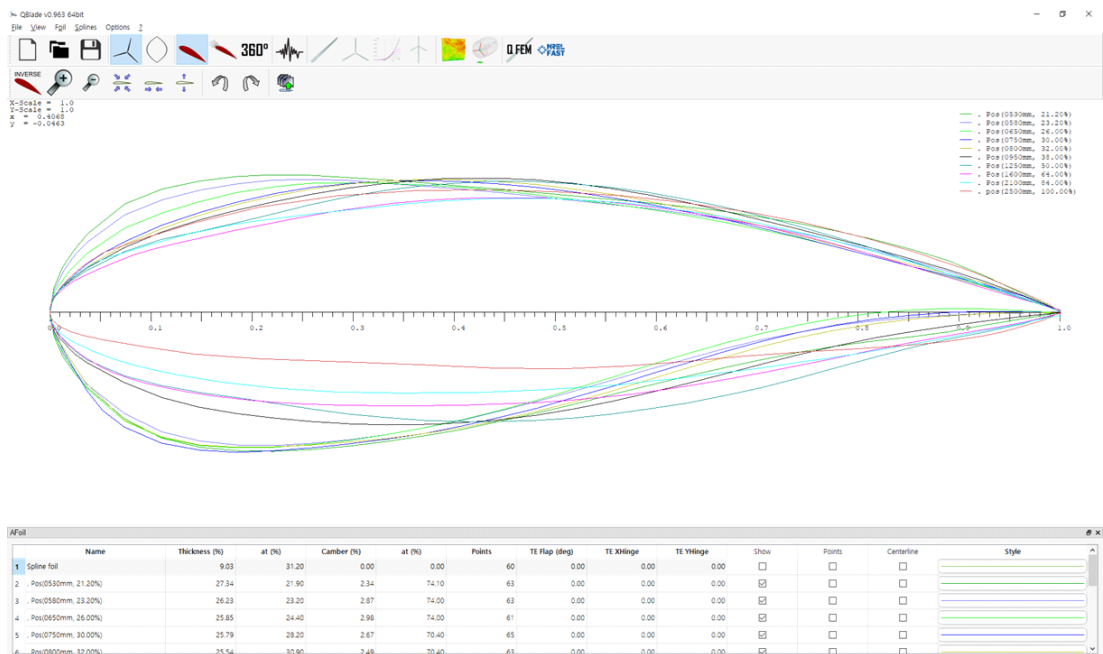


Fig. 30 User interface for airfoil design

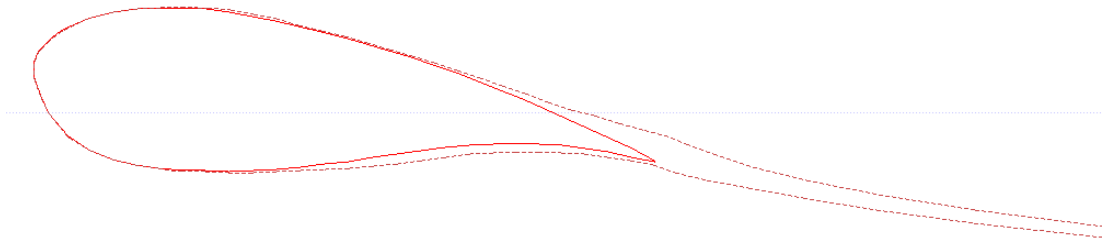


Fig. 31 Boundary-layer at 9° angle of attack around a REA 03

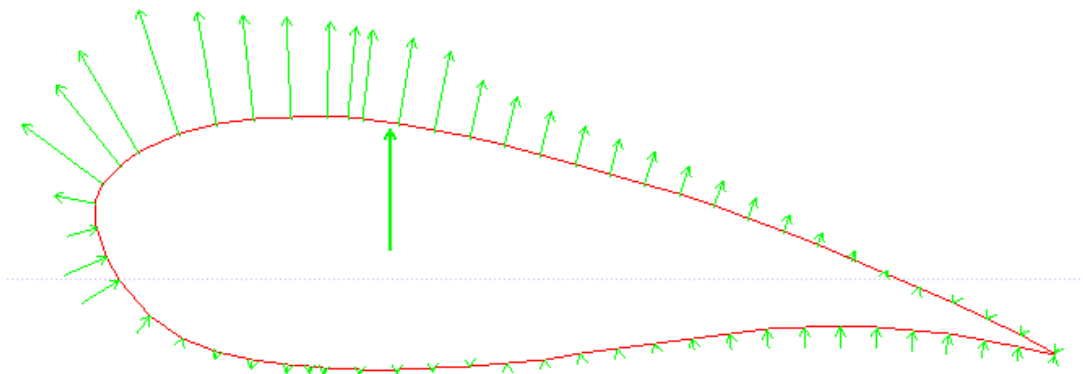


Fig. 32 Pressure distribution at 9° angle of attack around a REA 03

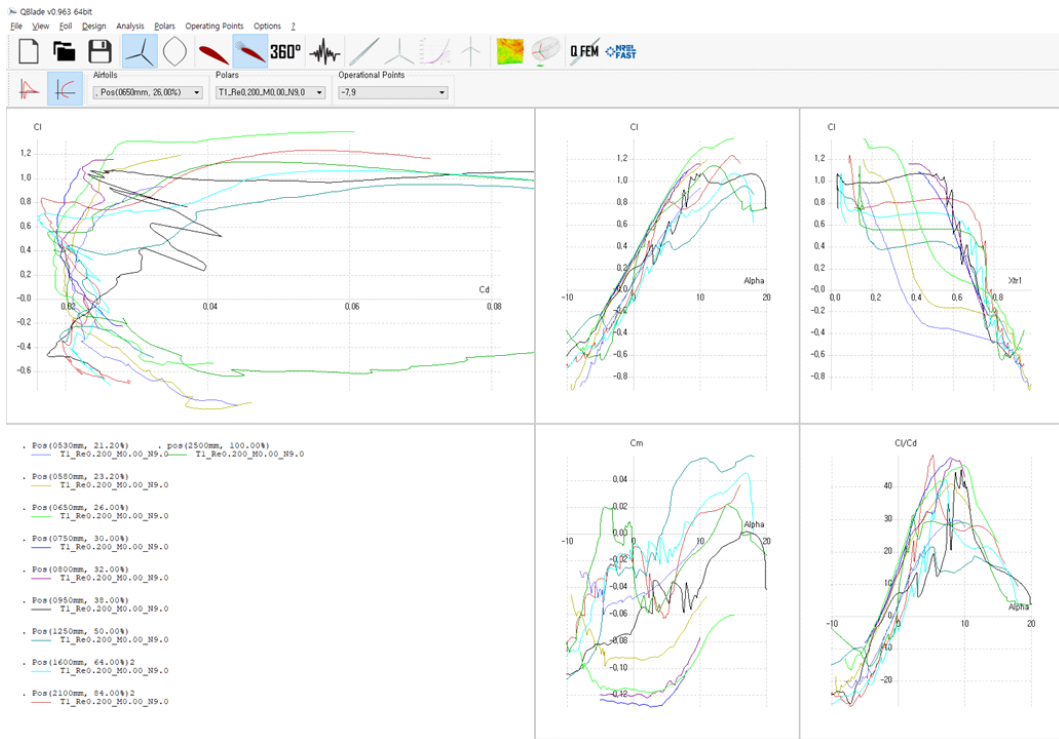


Fig. 33 User interface for XFOIL direct analysis

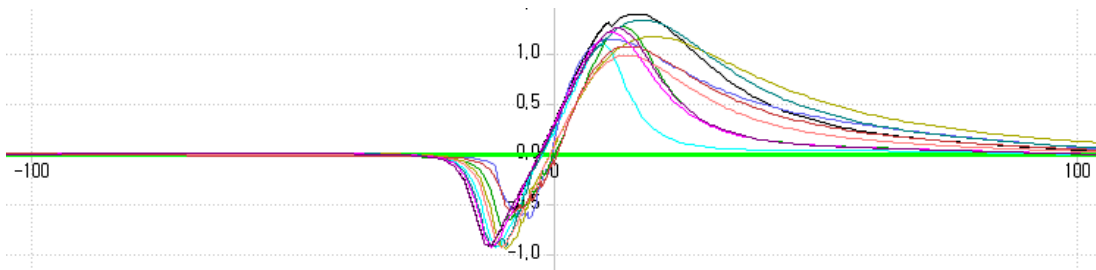


Fig. 34 Polar extrapolation to 360° at REA 10EA

### 4.3 역설계 로터블레이드 공력해석

HAWT Rotorblade Design에서는 블레이드의 3차원 블레이드의 형상을 효율적이며 직관적으로 설계하여 생성하기 위한 기능이며, 설겅값의 수정 또한 매우 간단하다. 역설계를 통해 블레이드 설계 시 Fig. 35와 같이 블레이드 요소에 대한 설겅값을 지정할 수 있다. 해당 과정에서는, 역설계 단계에서 획득한 데이터를 Table 9와 같이 정리하였고, 이때 Q-Blade에서는 사각 형상을 인식하지 못할 뿐만 아니라 온전한 에어포일 형상이 아닌 경우에는 해석 시 불완전한 결과를 수렴하게 될 수도 있는 잡음(Noise)을 최소화하기 위해 허브로부터 블레이드로 연결되는 루트(Root) 부위를 Fig. 36과 같이 원형 포일(Circular Foil)로 대체하였다.

역설계 기반의 설계 데이터를 HAWT Rotorblade Design에 입력하여 블레이드의 형상을 생성하였는데, 블레이드가 시작하는 지점인 허브 반경을 설정한 후 Insert after section 기능을 통해 블레이드 단면의 개수만큼 추가하여 Basic Blade Design에서는 각 에어포일의 로터 중심으로부터 반경 방향 위치인 Pos, 에어포일의 종류인 Foil, 에어포일의 폭은 Chord, 비틀림 각도는 Twist, 에어포일의 공기역학적 데이터인 Polar를 입력하고 Advanced Blade Design에서 비틀림 각도 회전축의 기준인 Twist Pt를 입력 후 블레이드 정면을 기준으로 한 X, Z 방향으로의 간격 X Offset, Z Offset을 입력하여 Fig. 37과 같이 역설계 에어포일 블레이드 모델을 생성하였고, CAD 블레이드를 Fig. 38, 해석 블레이드를 Fig. 39에 나타내었다. Q-Blade에서 생성한 블레이드는 STL 또는 텍스트 형식으로 3차원 블레이드 지오메트리 내보내기(Export 3D Blade geometry in STL or text format)기능을 사용하여 STL 형식의 파일 출력이 가능하다.

생성된 모델로부터 해석 방법과 가정을 적용하여 블레이드 3개로 구성된 로터 블레이드 단위의 BEM 시뮬레이션을 수행하였으며 로터블레이드의 출력계수는 Fig. 40에, 토크계수는 Fig. 41에 나타내었다.

Fig. 40에서 출력계수를 보면, 출력계수가 주속비에 비례하여 급격하게 증가하다가 주속비 6.2일 경우일 때 0.39로 가장 높은값을 보이며 주속비가 6.2보다 높아질수록 경우, 증가하던 출력계수가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 주속비가 높아질수록 3차원 블레이드에 대한 형상 조건과 선택된 블레이드 구간에서의 공력해석 조건(받음각, 유입속도 등)이 변화하는데, 상대속도가 느리고 유입각이 작아짐으로 인해 상대적으로 효율이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 회전속도나 풍속이 무조건 높기만 한 것이 효율적인 발전 성능을 나타내는 것은 아니라는 것을 확인할 수 있다.

이후 일정 범위에서의 특성 예측을 Fig. 42~Fig. 45와 같이 나타내었는데, 이와 같은 예측 경향성에 따라 최종 출력을 확인할 수 있는 터빈 단위의 해석이 진행된다.

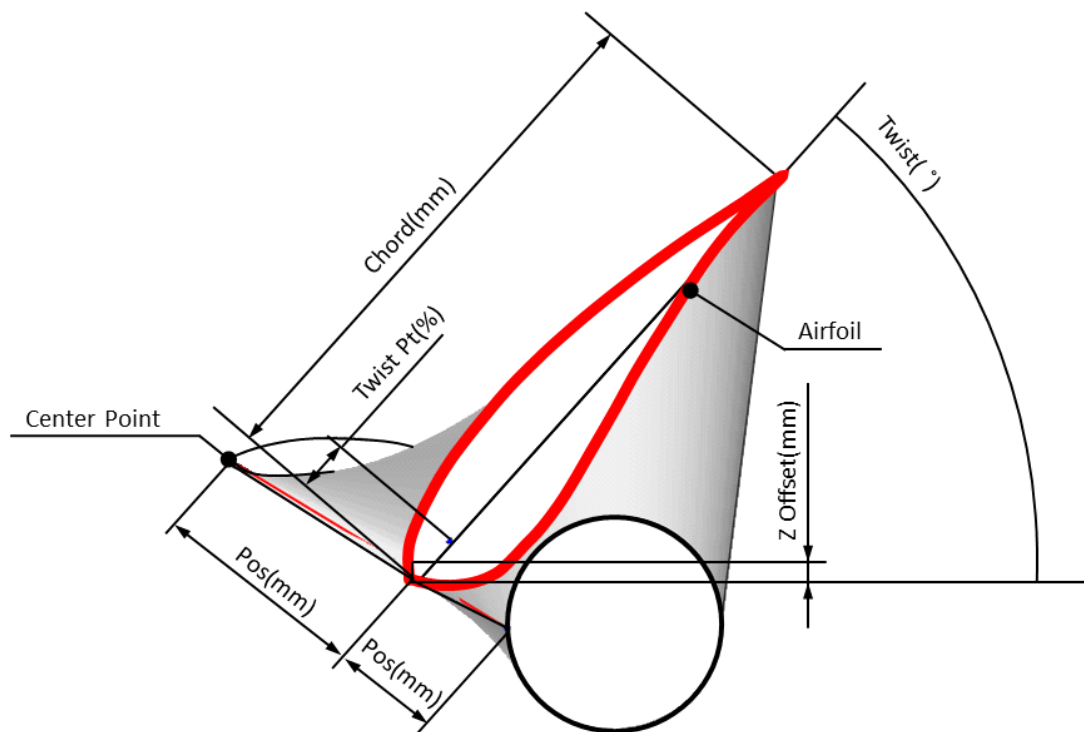


Fig. 35 Input data for blade design at Q-Blade



Table 9. Design variable data that can be input into Q-blade

Section	Radius (mm)	Chard (mm)	Twist ( ° )	X Offset (mm)	Z Offset (mm)	Twist Canter (%)
Circular Foil	100	148.809	0	0	-3.491	50.00%
	300	148.809	0	0	-3.491	50.00%
	330	150.253	0	0	-3.741	49.27%
	370	164.954	0	0	-8.183	44.39%
	410	197.137	0	0	-10.948	40.27%
	440	217.417	0	0	-4.913	39.35%
	480	240.747	0	0	-1.348	38.37%
REA01	530	263.176	9.37	0.000	-1.531	37.35%
REA02	580	276.932	10.43	0.000	-2.949	36.71%
REA03	650	282.497	10.51	0.000	-4.513	36.30%
REA04	750	272.958	9.18	0.000	-7.113	36.19%
REA05	800	264.214	8.60	0.000	-8.408	36.35%
REA06	950	233.414	7.37	0.000	-11.305	37.40%
REA07	1250	186.708	5.66	0.000	-14.467	40.35%
REA08	1600	156.885	4.29	0.000	-17.451	44.45%
REA09	2100	122.694	2.92	0.000	-19.790	52.37%
REA10	2500	104.407	3.23	0.000	-19.426	57.81%

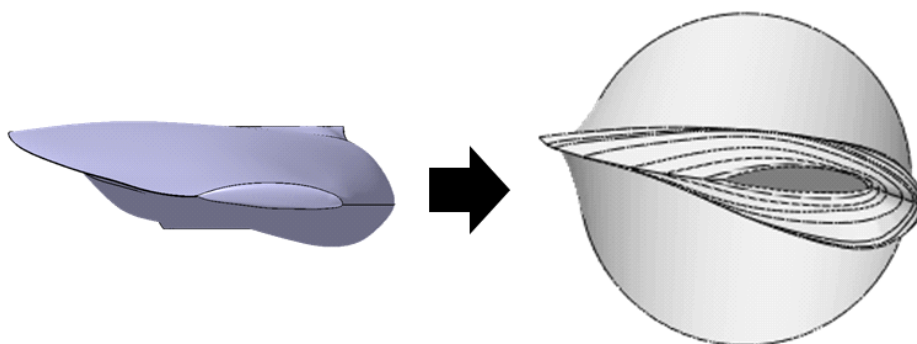


Fig. 36 Airfoil comparison



Fig. 37 HAWT REA blades In Q-Blade

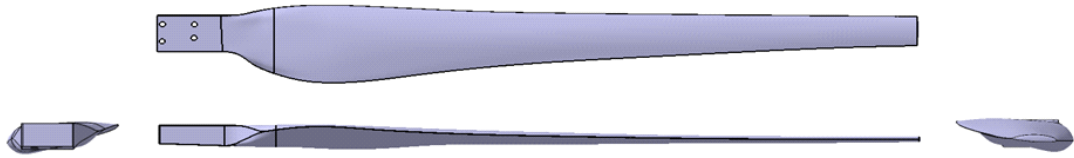


Fig. 38 Reverse engineered blade model in Catia v5

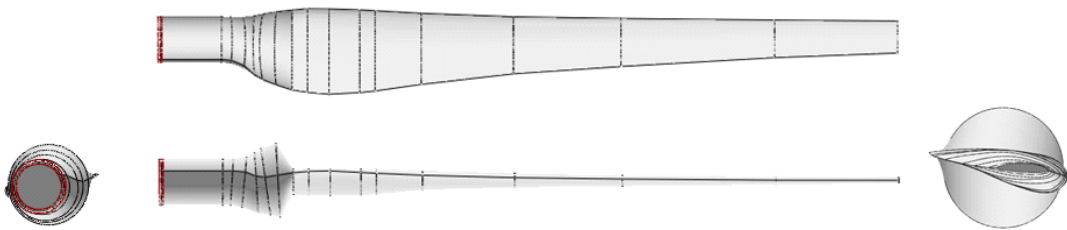


Fig. 39 Create a reverse engineered blade model for analysis in Q-Blade

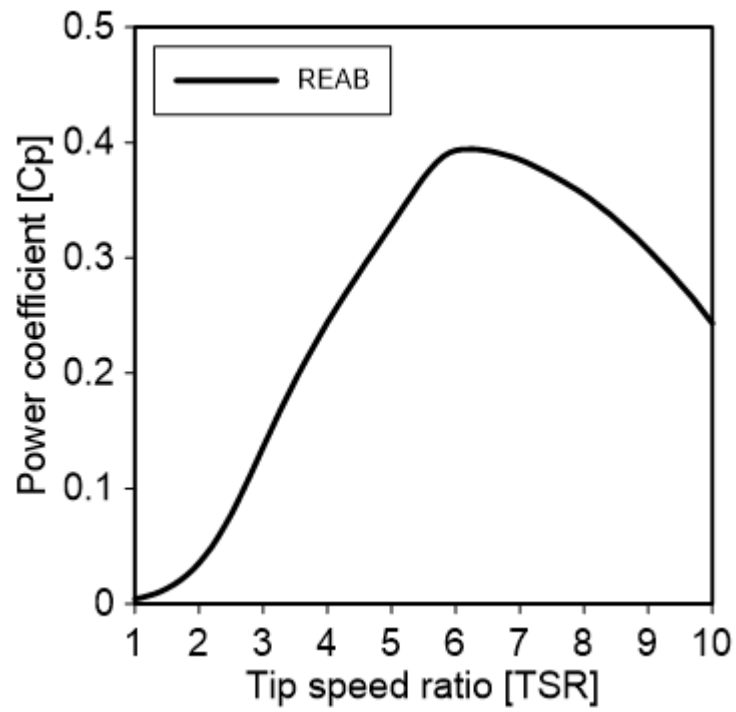


Fig. 40 Power coefficient of Reverse engineering blade

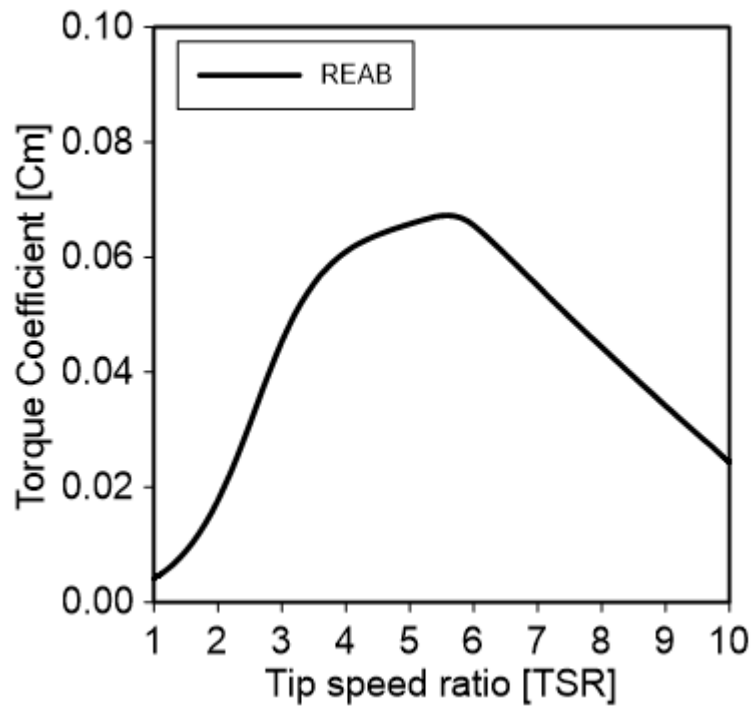


Fig. 41 Torque coefficient to blade circumferential speed ratio

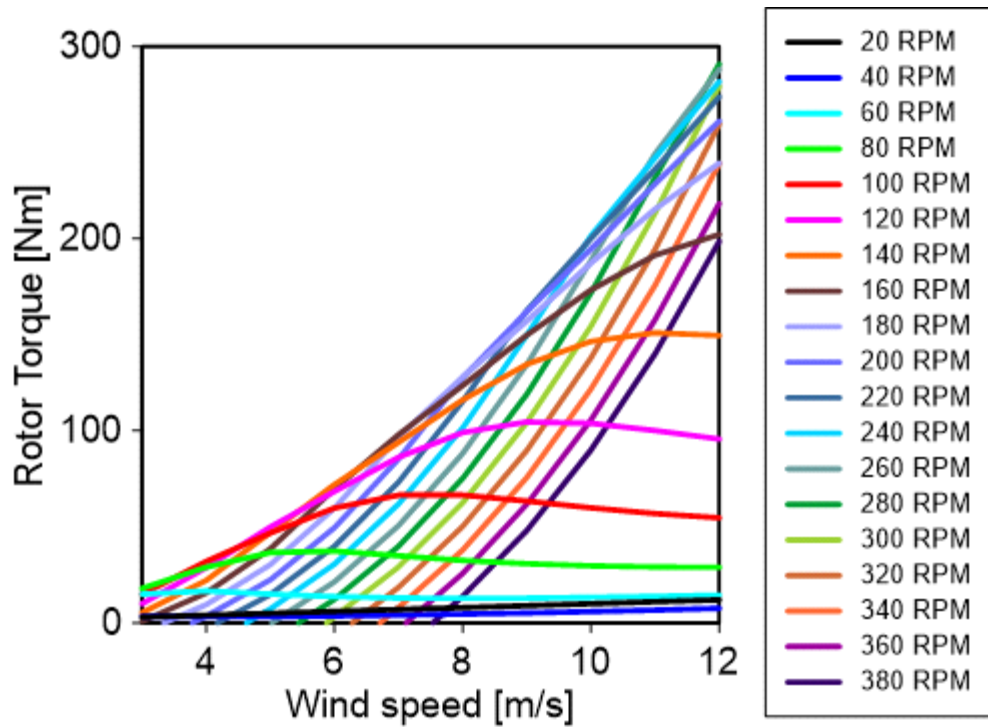


Fig. 42 Power prediction for blade wind speed at various RPM

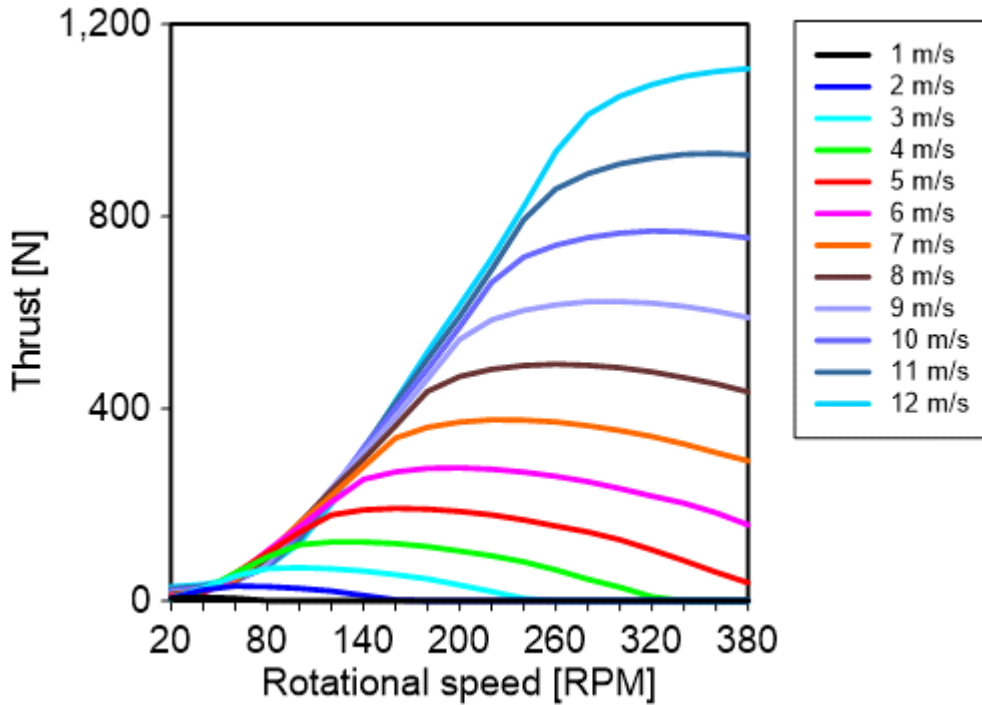


Fig. 43 Thrust prediction for blade RPM at various wind speeds

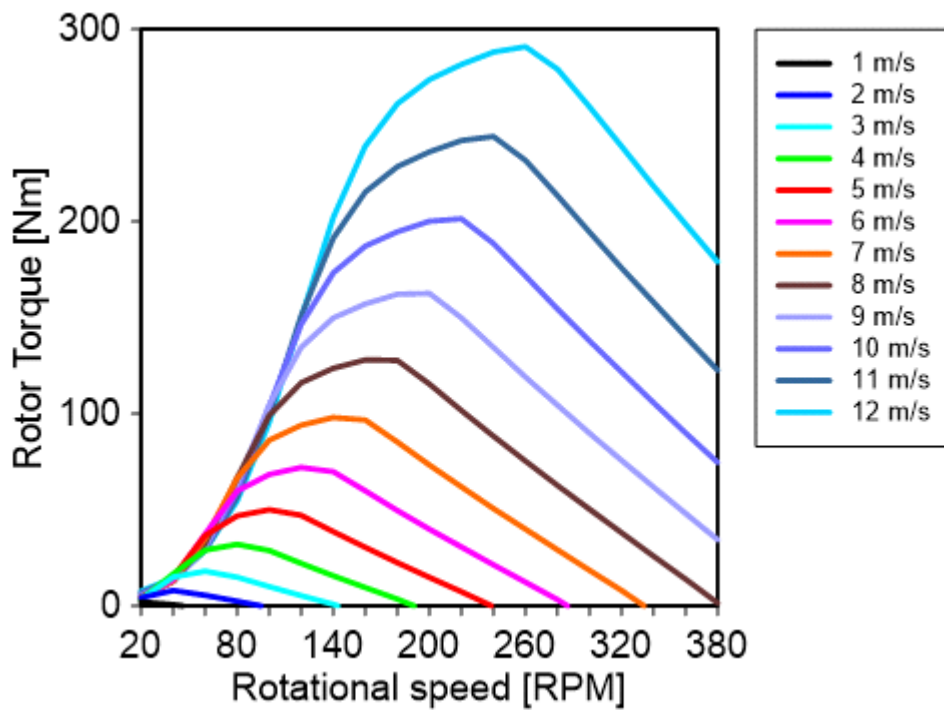


Fig. 44 Torque prediction for blade RPM at various wind speeds

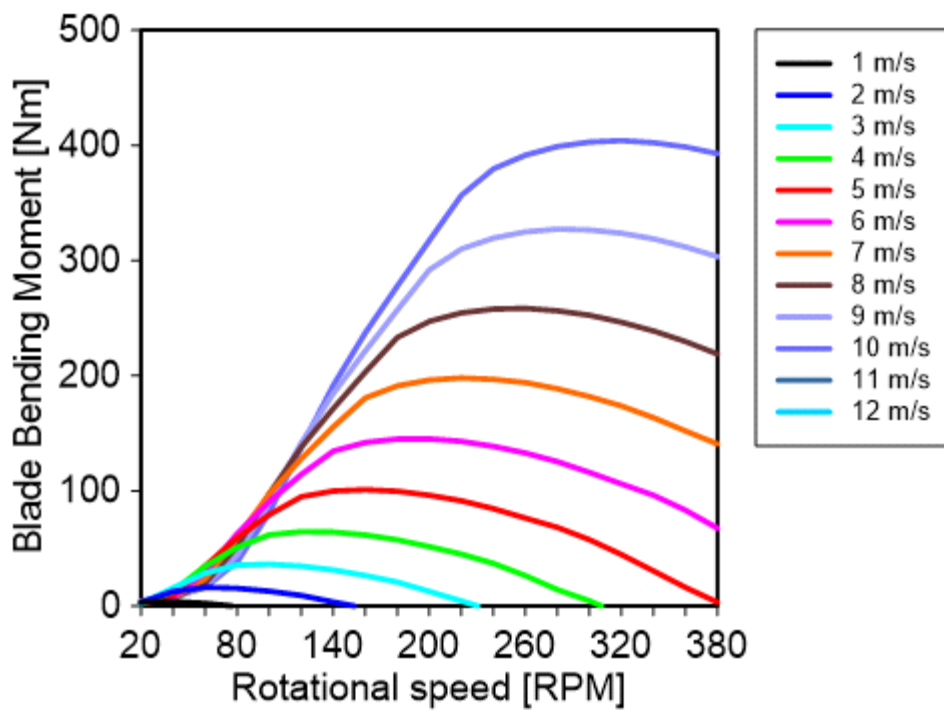


Fig. 45 Bending Moment Prediction for Blade RPM at Various Wind Speeds

#### 4.4 역설계 터빈의 성능해석 및 검증

역설계를 기반으로 생성한 블레이드로 터빈 단위의 공력해석을 수행한 결과와 역설계 대상인 A-사(社)에서 제시한 풍속대비 출력을 비교하여 Fig. 46에 나타내었다.

역설계 풍력터빈에 대하여 풍속 5 [m/s] 이하 구간에서 출력은, A-사(社)의 풍력터빈과 차이를 보이는데, 역설계 터빈 해석 시 설정값 중에 A-사(社)에서 제공한 입력 변수인 풍속 대비 회전속도를 기반으로 풍속대비 주속비와 그에 따른 출력계수를 확인한 결과, 특히 시동풍속인 3 [m/s]에서부터 매우 낮은 주속비를 나타내는 것을 확인할 수 있었고, 실제 블레이드는 회전을 통한 토크와 회전 각속도로부터 에너지를 얻기 때문에 이에 대한 고려가 필요한데, 원주 방향 풍속은 결국 블레이드의 회전속도로 정의되므로, 풍속에 대한 블레이드 회전속도의 비율은 출력계수를 결정하는 중요한 인자가 되며, 이는 바람의 자유 속도에 대한 블레이드 끝단 선속도의 비로써, 최종적인 블레이드의 출력계수는 주속비의 함수로 나타낸다. 따라서 해석 조건에서의 주속비는 Fig. 47에, 풍속대비 주속비에 따른 최종 출력계수는 Fig. 48과 같이 나타난다.

풍속대비 최종 출력계수를 보면 풍속 6 [m/s] 이후에 거의 일정하게 0.382 정도로 유지되는 것을 확인할 수 있으며, 풍속 5.4 [m/s] 구간에서 일시적으로 출력이 높아진 후 다시 일정한 경향성에 따르는 이유는, Fig. 47과 같이 풍속 5.4 [m/s] 구간에서 순간적으로 풍속대비 주속비에 따른 최종 출력계수가 0.393까지 상승한 후에 풍속 6 [m/s]부터 0.382 정도로 일정하게 나타나기 때문임을 확인되었다. 하지만 풍속 5 [m/s] 이상에서의 해석 결과는 그 성능의 차이가 2.28% 이하로 매우 정확하고 유사한 경향성을 나타낸다.

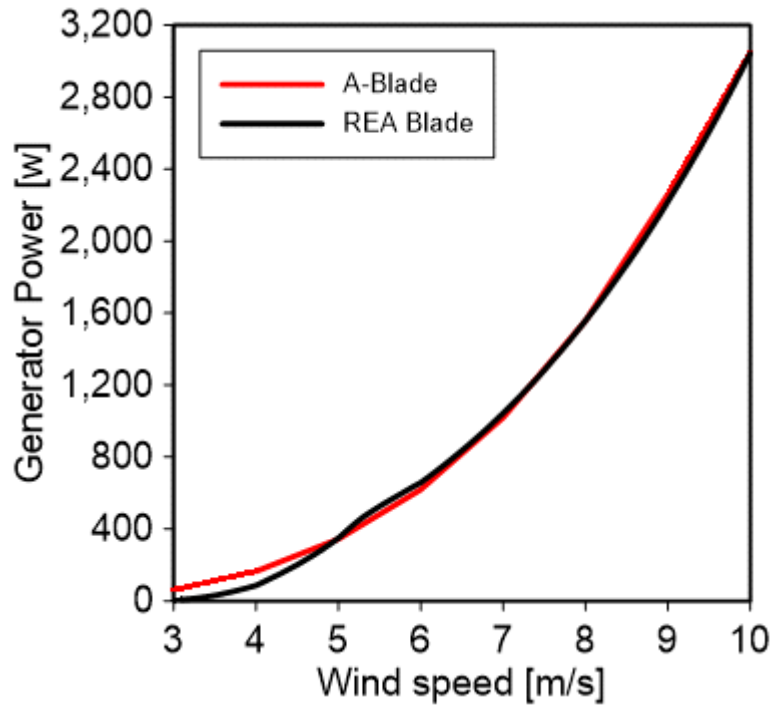


Fig. 46 Comparison of REAB and A-Blade

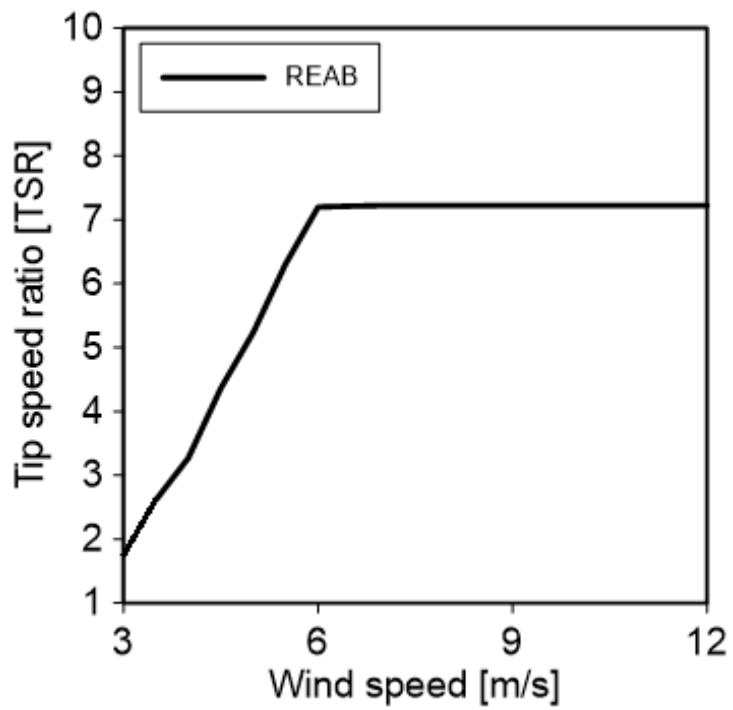


Fig. 47 TSR of revers engineering wind turbine



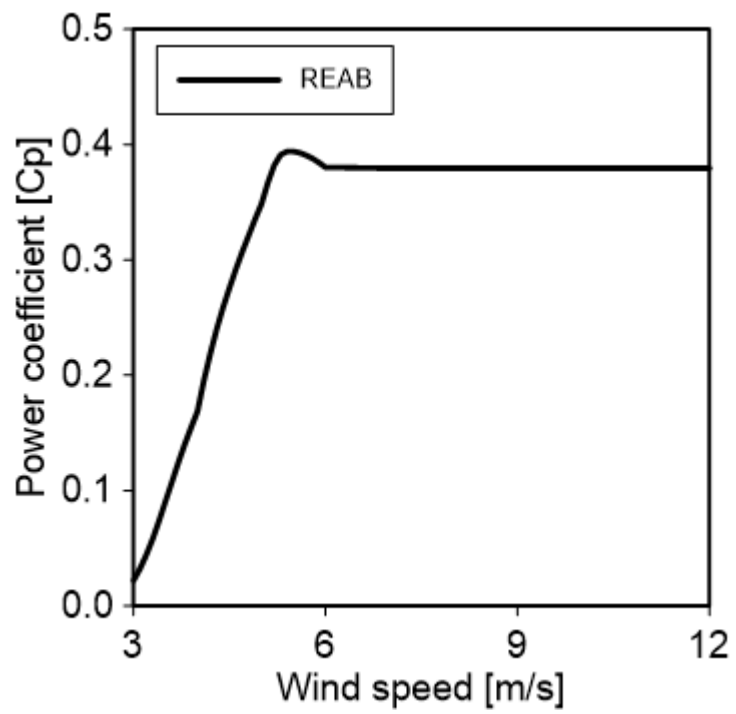


Fig. 48 Cp of revers engineering wind turbine

#### 4.5 에어포일 변경에 따른 공력성능 비교

역설계를 기반으로 획득한 설계 데이터를 기준으로, 미국 국립재생에너지연구소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)의 S822와 S823 에어포일을 사용하여 블레이드 설계의 설정값 중 하나인 에어포일에 대한 설계변경을 Fig. 49와 같이 수행하였으며, S822 에어포일 블레이드의 데이터를 Table 10.과 같이, S822-S823 블레이드의 데이터를 Table 11.과 같이, 총 2개의 블레이드의 모델을 추가로 생성하였다.

설계변경 블레이드는, 역설계 블레이드를 해석한 조건과 같은 조건으로 최종 출력을 예측하기 위해 터빈 단위의 해석을 수행하였으며 비교한 결과를 Fig. 50에 나타내었다.

성능해석의 결과는  $S822 < REA < S822-S823$ 의 순서로 차이가 나는 것을 확인하였고. 각각의 로터의 최대 출력계수는 Fig. 51과 같이 확인할 수 있다. 공력 성능에 대해서는, 이를 기반으로 로터 각각의 풍속 대비 주속비에 따라 결정되는 최종 출력계수를 Fig. 52에 나타내었다.

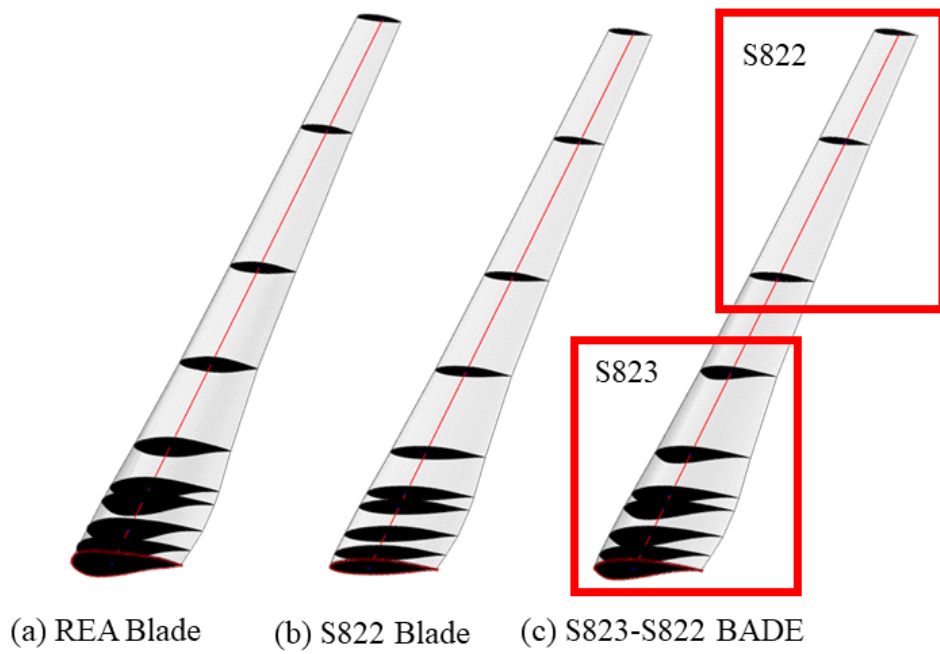


Fig. 49 Modelling of a blades with a changed design

Table 10. Blade with S822 input on reverse design data base

Section	Radius (mm)	Chard (mm)	Twist ( ° )	X Offset (mm)	Z Offset (mm)	Twist Canter (%)
Circular Foil	100	148.809	0	0	-3.491	50.00%
	300	148.809	0	0	-3.491	50.00%
	330	150.253	0	0	-3.741	49.27%
	370	164.954	0	0	-8.183	44.39%
	410	197.137	0	0	-10.948	40.27%
	440	217.417	0	0	-4.913	39.35%
	480	240.747	0	0	-1.348	38.37%
S822 Airfoil	530	263.176	9.37	0.000	-1.531	37.35%
	580	276.932	10.43	0.000	-2.949	36.71%
	650	282.497	10.51	0.000	-4.513	36.30%
	750	272.958	9.18	0.000	-7.113	36.19%
	800	264.214	8.60	0.000	-8.408	36.35%
	950	233.414	7.37	0.000	-11.305	37.40%
	1250	186.708	5.66	0.000	-14.467	40.35%
	1600	156.885	4.29	0.000	-17.451	44.45%
	2100	122.694	2.92	0.000	-19.790	52.37%
	2500	104.407	3.23	0.000	-19.426	57.81%

Table 11. Blade with S822, S823 input on reverse design data base

Section	Radius (mm)	Chard (mm)	Twist ( ° )	X Offset (mm)	Z Offset (mm)	Twist Canter (%)
Circular Foil	100	148.809	0	0	-3.491	50.00%
	300	148.809	0	0	-3.491	50.00%
	330	150.253	0	0	-3.741	49.27%
	370	164.954	0	0	-8.183	44.39%
	410	197.137	0	0	-10.948	40.27%
	440	217.417	0	0	-4.913	39.35%
	480	240.747	0	0	-1.348	38.37%
S822 Airfoil	530	263.176	9.37	0.000	-1.531	37.35%
	580	276.932	10.43	0.000	-2.949	36.71%
	650	282.497	10.51	0.000	-4.513	36.30%
	750	272.958	9.18	0.000	-7.113	36.19%
	800	264.214	8.60	0.000	-8.408	36.35%
	950	233.414	7.37	0.000	-11.305	37.40%
	1250	186.708	5.66	0.000	-14.467	40.35%
S822 Airfoil	1600	156.885	4.29	0.000	-17.451	44.45%
	2100	122.694	2.92	0.000	-19.790	52.37%
	2500	104.407	3.23	0.000	-19.426	57.81%

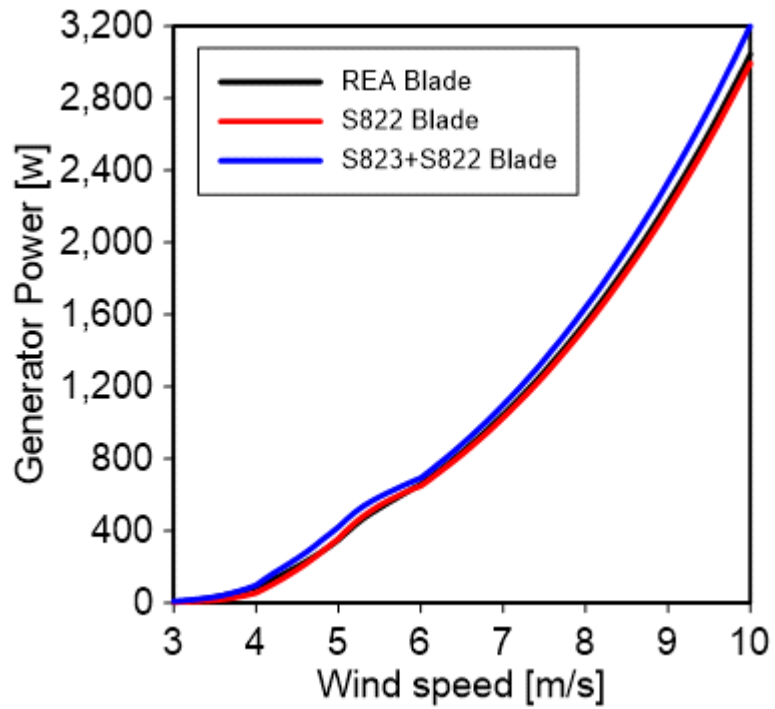


Fig. 50 Power generation to blades used different airfoils

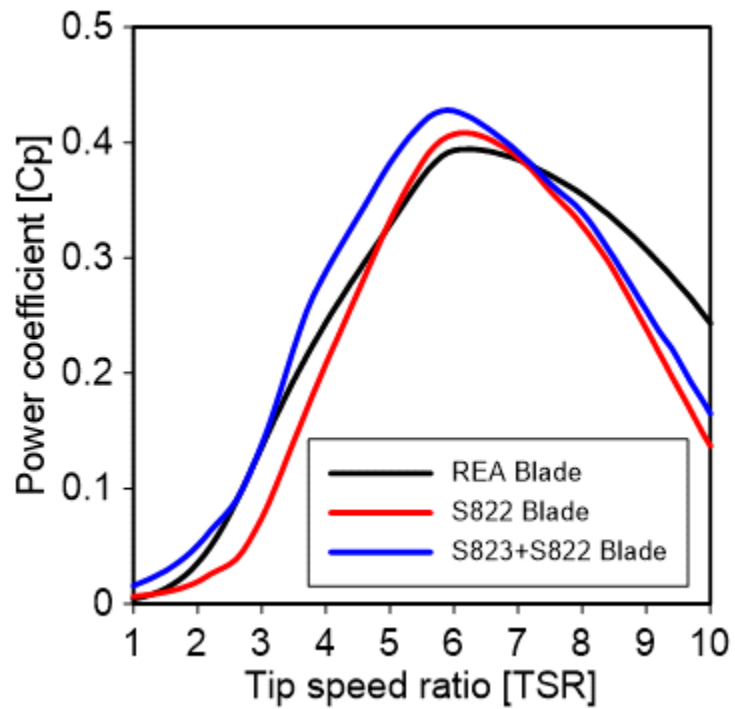


Fig. 51 Power Coefficient to blades used different airfoils

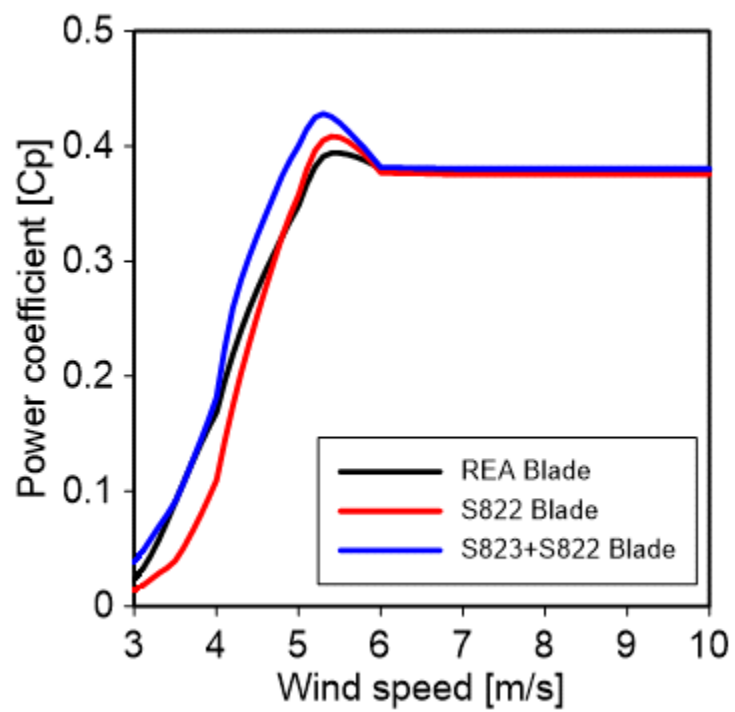


Fig. 52 Power coefficient compared to TSR of blades

#### 4.6 역설계 터빈의 최적 RPM 도출 및 해석

역설계를 기반으로 공력해석을 수행하는 과정에서, 역설계 블레이드로 구성된 로터의 최적 출력계수가 가장 높은 주속비의 구간은 6.2로 확인되었다. 풍력터빈이 목표 출력계수를 유지하기 위해서는, 피치제어와 같은 회전수 조절 방법을 통해 최적의 풍속 대비 주속비를 유지하여, 가능한 높은 출력계수의 값에서 풍력터빈이 작동할 수 있도록 설계해야 할 필요가 있다.

역설계 터빈의 주속비가 6.2에서 유지할 수 있는 최적의 회전속도를 도출하기 위해 Q-Blade 내에 있는 HAWT Transmission Optimal 기능을 사용하여 주속비를 6.2로 유지할 수 있는 풍속 대비 최적의 회전속도를 확인하였고, 그 결과값을 Fig. 53에 나타내었으며 해당 회전속도로 회전한다는 가정을 하여 풍력터빈의 해석을 재수행하였다.

최적의 회전속도를 적용하여 수행한 해석 결과는 Fig. 54에 나타내었으며 시동 풍속을 제외하고 A-사(社)에서 제공한 카탈로그의 출력과 회전속도를 가정하였을 때보다 6.01% 높은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.



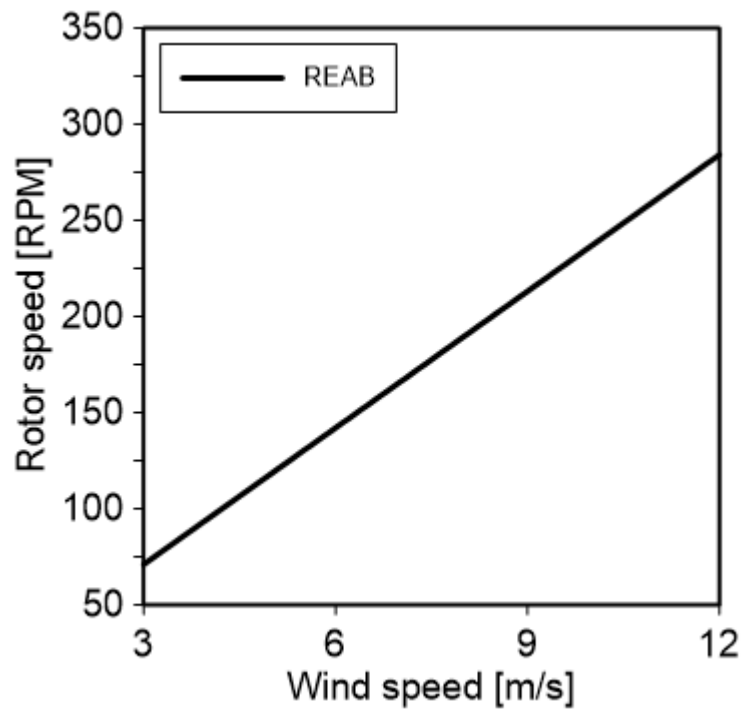


Fig. 53 Optimal RPM of Revers engineering airfoil blade

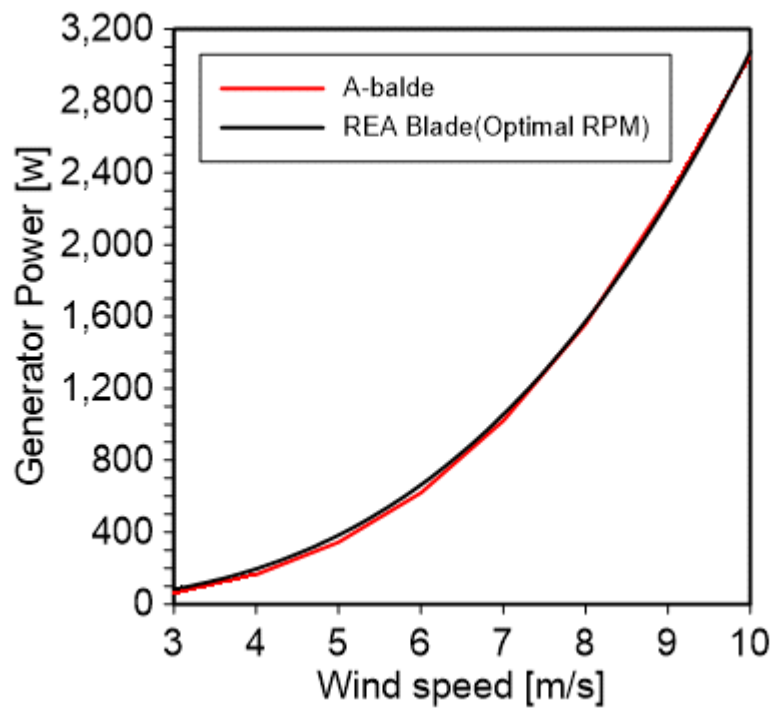


Fig. 54 Comparison of power generation between REAV and A-balde with optimal RPM applied

## V. 결론

본 연구에서는 풍력터빈 블레이드의 역설계를 기반으로 CAD/CAM/CAE에 활용할 수 있는 CAD 데이터의 생성과 이를 활용한 공력해석을 수행하였으며 역설계 프로세스의 효용성을 검증하였다.

역설계 모델에 대한 공력해석 결과는, 역설계 대상이었던 기존 상용 블레이드의 제원과 비교한 결과, 풍속의 3 m/s부터 10 m/s까지 시동풍속을 제외한 출력 성능 평균의 차이가 6.02%로 확인되었지만, 풍속이 5 m/s 이후의 해석 결과는 그 성능의 차이가 2.28% 이하로 매우 정확하고 유사한 경향성을 나타낸다.

역설계를 통한 블레이드의 주요 설계변수의 분석을 통해, 환경(부지 및 풍속 등)에 맞는 설계 목적에 따라 설계자의 의도와 부합하도록 설계변경을 수행할 수 있는 데이터를 확보할 수 있었고, 역설계 과정의 결과물은 부품의 제조와 최적 설계의 기반으로 활용할 수 있다.

이러한 설계 과정을 통해 풍력 블레이드뿐만 아니라, 자동차, 농업 장비, 항공기 및 방산 분야, 공작기계의 부품과 같이 재제조활용이 가능한 모든 분야에서 역설계 기법의 적용이 가능하며, 국내의 자체 기술력을 확보하는 국산화의 기반이 될 수 있다.

본 연구에서는 3D 스캐너를 활용한 풍력터빈 블레이드에 대해 오픈소스 코드를 활용하여 해석을 수행하였지만, 국산화 및 성능향상을 위해 Ansys-사의 Fluent를 활용하여 로터의 공기역학적 형상과 무개, 반대 방향으로 작용하는 토크 등을 고려한 해석으로 가변적인 회전속도를 도출하고, 설계변경에 따른 가변적인 공력 효율을 연동하여 최적화된 블레이드를 설계를 수행하고, 정밀 가공하여 풍동실험을 통해 그 결과를 검증하는 연구를 진행해 보고자 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 환경부, 2022, 파리협정 함께 보기
  
- [2] IEA, 2021, Energy Efficiency 2021
  
- [3] Anderson, J. D., 2011. “Fundamentals of Aerodynamics”, 5th Edition, McGraw-Hill Companies, Inc.
  
- [4] 정해상, 2011, “소형풍력발전기 설계와 제작”
  
- [5] Burton, T., Jenkins, N., Bossanyi, E., Sharpe, D., Graham, M., 2021, “Wind Energy Handbook 3rd Edition”, John Wiley & Sons Ltd.
  
- [6] 김동규, 최영도 “풍력터빈 블레이드 이론과 설계” 2013 pp.23~98
  
- [7] HtetMyat, 2016, “Design of A 50KW Wind Turbine For Generating Electrical Power For The College Of Mechanical Engineering,”
  
- [8] Song, Q., Lubitz, W. D., 2014, “Design and testing of a new small wind turbine blade,” J Sol Energy Eng, 136(3), 034502
  
- [9] Martin, O. L. H., “Aerodynamics of Wind Turbines 2nd”
  
- [10] Lock, C. N. H., and Yeatman, D., 1934, “Tables for use in an improved method of airscrew strip theory calculation,” Brit. A.R.C.R. & M. No. 1674

- [11] Solutionix, Solutionix C500 brochure - Medit
- [12] <https://digitizedesigns.com/3d-scanners/solutionix-c500/>
- [13] QBlade, URL: <http://www.q-blade.org>
- [14] Marten, D., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C., Paschereit C., 2010, "Integration of a WT Blade Design Tool in XFOil/XFLR5,"
- [15] Marten, D., Wendler, J., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C. N., and Paschereit, C. O., 2013, "QBlade: An Open Source Tool for Design and Simulation of Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines," International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, pp. 264 - 269.
- [16] Mark, D., 1989, "XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils," Conference on Low Reynolds Number Aerodynamics, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana,
- [17] Lee, N. J., 2016, "CFD and Model Experimental Study on Optimum Design of Counter-Rotating Tidal Current Turbine" PP. 41~44
- [18] Chang, S. M., Lee, J. H., 2007, "Aerodynamic Design of 10 kW-level HAWT Rotor Blades," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 35, No. 7, pp. 884-890.
- [19] Kim, K. P., Lee, M. W., Kim, M. O., Lee, Y. H., 2010, "Design of 5kW-class Small-scale Wind Turbine Using In-house Code POSEIDON," Wind Energy Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 26-32

[20] Montgomerie, B., 2004, "Methods for Root Effects, Tip Effects and Extending the Angle of Attack Range to  $\pm 180^\circ$ , with Application to Aerodynamics for Blades on Wind Turbines and Propellers," Scientific Report, Swedish Defence Research Agency, FOI-R-1035-SE

