

한국형 해상 풍력터빈 블레이드 최적설계 알고리즘 연구

이 기학¹⁾, 김 태윤²⁾, 김 규홍³⁾, 이 경태⁴⁾, 이 동호⁵⁾

Numerical Optimization of Offshore Wind Turbine Blade for Domestic Use

Ki-Hak Lee, Tae-Yoon Kim, Kyu-Hong Kim, Kyung-Tae Lee, Dong-Ho Lee

Key words : Offshore wind turbine(해상풍력터빈), HAWT(수평축 풍력발전), XFOIL, Minimum energy loss(최소에너지손실), Response Surface Method(반응면기법), Sequential Quadratic Programming(순차이차계획법)

본 연구의 목적은 차세대 대체에너지로 각광받는 풍력발전 중에서 육상발전보다 여러 가지 이점이 있는 해상에서의 한국형 풍력터빈 블레이드의 최적형상을 위한 알고리즘을 구현하는 것이다. 풍력터빈 블레이드에서 깃익형의 공기역학적 특성은 매우 중요한 사항이다. 이를 위해서 익형 성능예측에 종류에서 난류로의 천이과정을 포함하는 XFOIL을 이용하여 블레이드 익형 단면의 양력과 항력 분포를 해석하였다. 첫 번째 수준의 설계변수는 운용범위내의 바람의 속도와 블레이드 지름, 축 회전수이며, 각 단면에서의 비틀림각과 시위길이는 두 번째 수준의 설계변수이다. 운용범위 내의 각 설계점에서 익형의 공력변수들과 최소에너지손실 조건을 이용하여 시위길이와 피치각 분포를 최적화하였다. 각각의 설계점에서 결과를 바탕으로 풍력발전의 설계 운용범위에서 반응면을 구성하고 구배최적화 기법을 통해 요구동력의 제약함수를 만족하고 효율을 최대로 하는 블레이드 형상을 구현하였다. 최적형상에 대해 탈설계점 해석을 수행하여 그 성능을 구하였다.

Nomenclature

C_F	: Power coefficient
C_T	: Thrust coefficient
D	: Blade diameter
M_{tip}	: Tip Mach Number
P	: Output Power required
R	: Blade radius
V	: wind speed
X	: Tip-speed ratio
η_F	: Froude efficiency
Ω	: Blade angular velocity
ρ	: air density

Laboratory)과 정부의 지원을 받는 풍력업체가 주도적으로 역할을 수행하고 있다. 유럽의 경우에는 유럽공동체(EU)의 주관으로 에너지 관련 기술을 증진시키고 공해물질 배출을 억제하며, 관련기술의 제3국 전수를 진행하였고, 에너지 관련 기술의 연구개발 및 시범보급에 많은 투자를 하고 있다.

오늘날의 풍력기술개발목표 중 가장 두드러지는 특징은 풍력발전기의 대형화라고 할 수 있으며, 경제적인 측면에서 경쟁력 있는 풍력발전기의 규모는 1~3MW급으로 판명됨에 따라 미국을 비롯한 선진국에서는 1MW급 이상 3~4MW급의 초대형 풍력발전기의 개발연구가 진행되고 있다.

해상풍력은 해안에서 일정거리의 바다 위에 대용량의 풍력발전기를 설치하여 전기를 생산하는 것으로서 바람의 세기가 강하면서 풍량이 지속적으로 유지된다. 또한 해상풍력발전은 자연환경 훼손 문제 등과 부지 확보가 용이한 장점도

1. 서 론

세계 각국은 풍력발전 설비의 실용화 보급에 치중하면서 보다 경제적이고 신뢰성 있는 풍력발전기를 개발하려는 노력을 멈추지 않고 있다. 미국은 첨단 풍력발전기를 개발하는 사업에 중점적으로 지원을 하고 있으며, 풍력단지의 개발보급을 위한 지원사업도 병행하고 있다. 풍력발전기 기술개발은 주로 NREL(Nation Renewable Energy

- 1) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : ricky65@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
- 2) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
- 3) 서울대학교 기계항공공학부
- 4) 세종대학교 기계항공우주공학부
- 5) 서울대학교 기계항공공학부

있다. 또한 타워가 난파선 구실을 하면서 어류를 끌어 모으는 것으로 밝혀졌다.

바람이 가지는 운동에너지를 필요한 동력으로 전환시키는 로터 블레이드는 풍력발전 시스템의 효율을 결정짓는 중요한 부분이다. 풍력터빈 블레이드의 설계는 회전의 성능과 더불어 블레이드의 공탄성 해석, 타워 구조에 영향을 미치는 구조하중 해석, 그리고 소음과 같은 여러 설계요구조건을 가지는 다분야최적설계 문제이다.

본 연구에서는 국내에서 해상풍력발전을 설치하기 위한 연안의 풍황조건을 조사하였다. 이 자료를 바탕으로 수평축 해상풍력터빈 블레이드를 최적설계하기 위한 알고리즘을 구현하고 최적형상에 대해서 탈설계점 해석을 수행하였다.

2. 한국형 해상풍력터빈 블레이드 개념설계

2.1 해상풍력터빈 설계를 위한 풍속 자료

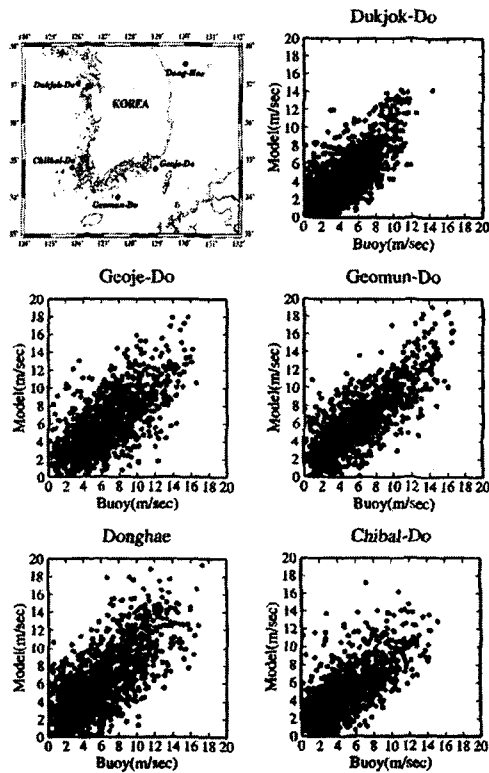


Fig. 1 한반도 주변 연안의 평균 해상풍(2002년)⁽¹⁾

그림 1은 개략적인 국내 주요 연안의 해상풍 자료이다. 풍력발전의 가장 중요한 조건이 풍속과 풍향인 점을 감안해 볼 때 전체적으로 국내 풍황조건은 유럽이나 미국보다 열악한 조건을 가지고 있다. 특히, 풍속의 경우에는 해외 풍력터빈의 정상 운영범위가 16m/s인 점을 감안하면 상대적으로 열악한 조건이다. 따라서 국내 해상풍력터빈에 적절한 초기 설계풍속범위를 8~12m/s로 설정하고 설계하였다.

2.2 풍력터빈 블레이드 최적설계 알고리즘

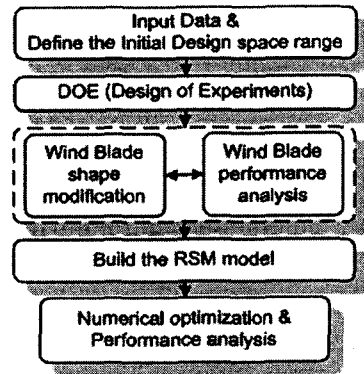


Fig. 2 Flow chart of the all design process

그림 2에서 풍력터빈 블레이드의 전체설계과정을 나타내었다. 표 1에서는 설계과정에서 사용된 목적값과 제약조건, 설계변수를 설정하였다.

1차 수준의 설계변수는 풍력터빈의 운용범위에 필요한 풍속, 블레이드 지름, 그리고 축회전수로 설정하고 제약조건을 만족하면서 가장 효율이 뛰어난 설계점을 구하였다.

Table 1 Design parameter의 정의

Objective	Froude efficiency	
Constraints	Power Required, Tip Mach number	
Design variables	1 st level group	Wind speed Blade diameter Shaft speed
	2 nd level group	Twist angle, Chord length at the each blade section along the radius
Design points	Blade hub altitude, Tower load	

3. 설계 최적화 기법과 해석

풍력터빈 블레이드 설계에 적용된 각 변수 그룹별 설계최적화기법을 표 2에서 나타내었다.

Table 2 각 변수 그룹별 설계최적화 기법

1 st level group	RSM, SQP
2 nd level group	Minimum energy loss method

3.1 풍력터빈 블레이드 형상 최적화

운동량 이론과 블레이드 요소 이론을 혼합하여 프로펠러 후류의 수축을 무시하더라도 반경방향 유동에 의한 운동량 손실 부분을 수정하여 프로펠러 블레이드 설계를 위한 해석방법을 제시한 Glauert⁽²⁾ 이후, 블레이드 형상 설계에 적용될 에너지 손실을 최소화하기 위한 설계 조건은 Betz에 의해 제시되었다. 본 연구에서는 C. N. Adkins⁽³⁾ 등의 최소에너지손실 기법을 풍력터빈 블레이드 설계에 적용하였다⁽⁴⁾.

3.2 블레이드 익형의 공력성능 해석

본 연구에서 각 단면의 블레이드 익형의 유동 해석에 이용된 M. Drela의 XFoil⁽⁵⁾은 아음속 정상유동의 익형 주위의 비정상과 경계층을 포함하는 점성영역이 결합된 유동을 해석한다. XFoil은 선형 와도 패널법을 이용하는 비정상 자유흐름과 경계층과 천이식을 포함하는 점성유동장을 global newton method에 의해 동시에 계산하므로 다른 점성수치기법에 비해 상당히 빠른 시간 내에 해석이 이루어진다.

각 블레이드 단면에 적용된 익형은 Wortmann FX66-S-196 익형⁽⁶⁾으로 형상은 그림 3과 같다.



Fig. 3 Wortmann FX66-S-196 airfoil

3.2 반응면기법과 구배최적화기법

풍력터빈 블레이드 설계를 위해서 첫 번째 수준 설계변수에 3^차 Full factorial experimental designs를 적용하여 실험점 개수를 설정하였다. 또한 설계변수의 변화에 따른 목적함수의 변화를 설계공간에서 모델링하여 반응면을 구성하고, 반응면상의 최적화를 수행하는 반응면 기법을 적용하였다⁽⁷⁾.

구성된 첫 번째 수준의 설계변수 영역에서 각 제약조건을 충족시키면서 추진효율을 최대화하는 설계점을 구하기 위해서 국부최적화 이론인 SQP(Sequential Quadratic Programming)⁽⁸⁾을 적용하였다. 설계를 위한 목적함수와 제약조건, 그리고 변수의 한계는 다음과 같다.

$$\text{Maximize } \eta_F(x) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } M_{tip}(\bar{x}) \leq 0.3 \quad (2)$$

$$P_{required} \leq P(\bar{x}) \quad (3)$$

$$\bar{x} = [V, D, RPM]^T \quad (4)$$

$$8 \leq \text{wind speed} \leq 12 \text{ (m/s)}$$

$$100 \leq \text{blade diameter} \leq 120 \text{ (m)} \quad (5)$$

$$8 \leq \text{shaft speed} \leq 12 \text{ (rpm)}$$

날개 끝에서 마하수는 소음의 영향과 압축성 효과를 방지하는 0.3 이하로 설계되었다.

4. 해상풍력터빈 블레이드 설계결과

작성된 풍력터빈 블레이드 최적설계 프로그램을 그림 4와 같은 해상풍력터빈 블레이드 설계에 적용하였다. 풍력터빈 블레이드의 효율과 성능계수는 다음과 같다

$$\text{Froud efficiency: } \eta_F = \frac{27}{16} C_P \quad (6)$$

$$\text{Tip-speed ratio: } X = \frac{R\Omega}{V} \quad (7)$$

$$\text{Power coefficient: } C_P = \frac{2P}{\rho V^3 \pi R^2} \quad (8)$$

$$\text{Thrust coefficient: } C_T = \frac{2T}{\rho V^2 \pi R^2} \quad (9)$$

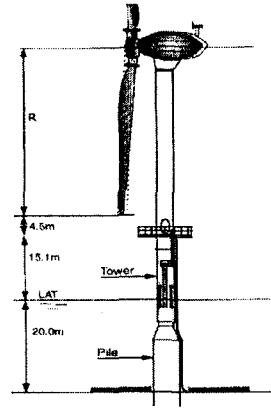


Fig. 4 해상풍력터빈의 개략도

4.1 설계운용범위 내에서의 최적설계결과

1차 수준의 설계변수인 운용범위 내에서 설계된 최적형상들의 Froude 효율과 요구동력 분포를 그림 5와 6에서 나타내었다. 설계운용범위 내에서 풍속이 감소할수록, 블레이드 지름이 증가할수록 Froude 효율은 증가하는 반면에, 요구동력은 풍속이 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 설계운용범위 내에서 블레이드 끝 마하수는 0.3 이하의 값을 나타내었다.

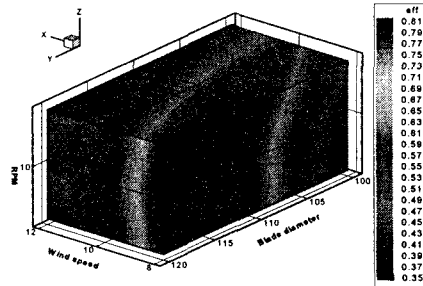


Fig. 5 전체 운용범위 내에서 Froude 효율 분포

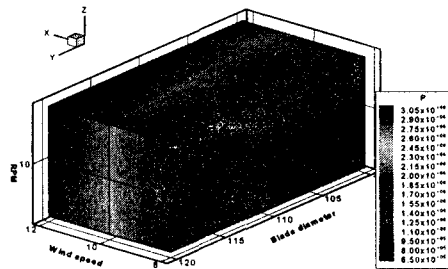


Fig. 6 전체 운용범위 내에서 요구동력 분포

4.2 최적설계 형상의 성능 해석

허브높이 70m에서 300kN의 타워하중 설계조건에서 제약조건인 요구동력을 만족하고 Froude 효율을 최대로 하여 설계된 풍력터빈 블레이드 형상의 각 매개변수들을 표 4에서 나타내었다.

Table 4 풍력터빈 블레이드 최적 설계변수의 비교

Design Parameter		Designed blade
Design conditions	Hub altitude	70m
	Tower load	300kN
Design variables	Wind speed	11.827m/s
	Blade diameter	115.324m
	Shaft speed(RPM)	8.913
Objective	Froude efficiency	47.579%
Constraints	Power Required	3MW
	Tip Mach Number	0.16197
	Airfoil	FX66-S-196

풍력터빈 블레이드의 최적설계 과정에 따른 결과로서, 무차원화된 블레이드 반경방향에 따른 시위길이와 피치각 분포를 그림 7에서 나타내었다. 그림 8은 설계된 블레이드 최적형상이다.

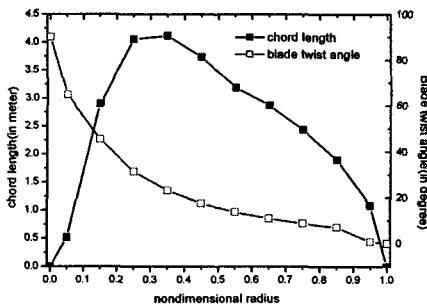


Fig. 7 반경방향에 따른 시위길이와 레이놀즈수 분포

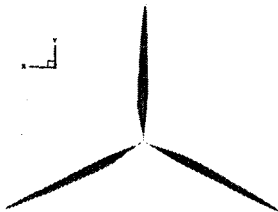


Fig. 8 풍력터빈 블레이드 최적형상

4.3 탈설계점 성능 해석

풍력터빈 블레이드 최적형상의 탈설계점 효율 성능해석 결과 중에서 풍속과 축회전수를 포함하는 Tip-speed ratio에 따른 Froude 효율 분포를 나타낸 그림 9에서 보면 Tip-speed ratio가 6 정도 일 때 가장 좋은 효율을 보였다.

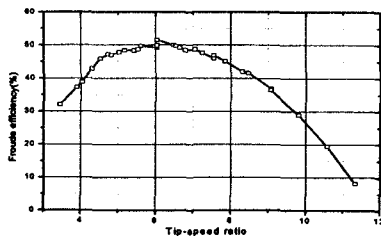


Fig. 9 Tip-speed ratio에 따른 Froude 효율 분포

5. 결론

본 연구에서는 한국형 해상풍력터빈의 운용범위 내에서 설계요구조건에서 각 설계점에서 제약조건을 만족하면서 최대 효율을 발생하는 최적설계 형상을 도출하고, 블레이드 형상의 탈설계점 성능해석을 위한 알고리즘과 설계툴을 구성하였다. 많은 수의 변수를 효율적으로 구성하기 위해서 각 수준별로 변수 그룹을 설정하였고 각 변수별로 다른 설계기법을 적용함으로써 프로그램의 효율성을 높였다. 허브높이 70m에서 300kN의 타워하중 설계 조건에서 요구동력 3MW와 블레이드 끝 마하수 0.3 등의 제약조건을 만족하는 최대 Froude 효율에서 1차 수준 설계변수값은 풍속이 11.827m/s, 블레이드 지름 115.324m, 그리고 축회전수 RPM이 8.913이다. 이 때의 Froude 효율은 47.579%이다.

차후 반응면의 정확도를 높이고 합당한 설계영역을 찾기 위한 1차 수준 설계변수의 공간 이동과 국내의 열악한 풍황조건에서 높은 성능을 낼 수 있는 한국형 해상풍력터빈용 익형 개발이 이뤄져야 한다. 또한 공력성능 향상과 더불어 다분야 최적설계기법을 이용한 블레이드 공탄성 해석과 소음 감소를 위한 연구가 병행되어야 할 것으로 보인다.

Acknowledgments

본 연구는 서울대학교 BK21사업과 한국과학기술원 지정 최적설계기술연구센터의 지원에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

References

- [1] 서장원, 장유순, 중규모 기상모델과 3세 대 파랑 모델로 계산된 한반도 주변해역의 2002년 월평균 해상풍과 파라분포 특성", 한국해양학회지, 제8권, 제3호, pp.262-273, 2003년
- [2] Glauert H., "The elements of airfoil theory and airscrew theory", London, Cambridge Univ. 1959년
- [3] Charles N. Adkins, Robert H. Liebeck, "Design of Optimum Propellers," Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 5, September-October 1994, pp. 676~682.
- [4] 이기학, 김규홍, 이경태, 안 준, "저레이놀즈수 영역의 초소형비행체 프로펠러 설계 및 해석," 한국항공우주학회지, 제30권, 제5호, 2002.
- [5] Drela. M., "XFoil: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoil," Low Reynolds Number Aerodynamics, Springer-Verlag, New York, 1989, pp. 1~12.
- [6] "UIUC Airfoil Coordinates Database," <http://www.aae.uiuc.edu/m-selig/ads/coord_databases.html>
- [7] Myers, R.H, Montgomery, D.C, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & Sons, New York, Ny, 1995
- [8] Vanderplaats, G.N., Miuea, "DOT Users Manual", VMA Engineering, 1994