

설계공간 타당성 향상을 통한 한국형 해상풍력터빈 블레이드 최적형상설계 연구

이 기학¹⁾, 주 완돈²⁾, 홍 상원³⁾, 김 규홍⁴⁾, 이 경태⁵⁾, 이 동호⁶⁾

Numerical Optimization of Offshore Wind Turbine Blade for Domestic Use using Improvement of the Design Space Feasibility

Ki-Hak Lee, Wan-Don Joo, Sang-Won Hong, Kyu-Hong Kim, Kyung-Tae Lee, Dong-Ho Lee

Key words : Offshore HAWT(해상수평축풍력터빈), XFOIL, Minimum Energy Loss Method(최소에너지손실 방법), Design of Experiments(실험계획법), Response Surface Method(반응면기법), Sequential Quadratic Programming(순차이차계획법), Probability Method(확률적 방법), Optimization(최적화), Off-Design Analysis(탈설계점 해석)

Abstract : 본 연구의 목적은 차세대 대체에너지로 각광받는 풍력발전 중에서 육상발전보다 여러 가지 이점이 있는 한국형 해상풍력터빈 블레이드의 최적형상설계를 위한 알고리즘을 구현하는 것이다. 블레이드 단면 익형의 양력과 항력 분포는 XFOIL을 이용하여 예측하였다. 첫 번째 수준의 설계변수인 각각의 블레이드 지름과 축 회전수에서 익형의 공력변수들과 최소에너지손실 조건을 이용하여 두 번째 설계변수인 각 블레이드 단면에서의 시위각과 피치각 분포를 최적화하였다. 그리고 성능결과를 바탕으로 반응면을 구성하고, 확률적 방법을 이용하여 타당성 있는 설계공간까지 첫 번째 설계변수를 이동시키고 구배최적화 기법을 통해 각각의 제약함수를 만족하면서 목적함수를 최대로 하는 최적블레이드 형상을 구현하였다. 설계된 최적형상에 대해 탈설계점 해석을 수행하여 성능을 구하였다.

Nomenclature

- B : number of blades
- c : blade chord [m]
- C_F : power coefficient
- C_T : thrust coefficient
- D : blade diameter [m]
- M_{tip} : tip Mach number
- P : output power [W]
- R : blade radius [m]
- rpm : rotational speed [rev/min]
- T : blade thrust [N]
- U_∞ : wind speed [m/s]
- β : pitch(twist) angle
- λ : tip-speed ratio
- η_F : Froude efficiency
- Ω : blade angular velocity
- ρ : flow density
- σ : solidity

발전기를 개발하고 있다. 미국은 첨단 풍력발전기를 개발하는 사업에 중점적으로 지원을 하고 있으며, 풍력단지의 개발보급을 위한 지원사업도 병행하고 있다. 풍력발전기 기술개발은 주로 NREL (Nation Renewable Energy Laboratory)과 정부의 지원을 받는 풍력업체가 주도적으로 역할을 수행하고 있다. 유럽에서 가장 많은 풍력발전기를 설치한 나라는 독일로서 전체 전력 수요의 6.5%를 풍력발전으로 충당한다. 유럽공동체(EU)는 2010년까지 10만MW의 전력을 풍력발전으로 충당할 계획을 갖고 있다. 오늘날의 풍력기술개발목표 중 가장 두드러지

1. 서 론

풍력발전은 환경 오염 물질의 배출이 없는 청정 에너지로서 세계 각국은 풍력발전 설비의 실용화 보급에 치중하면서 보다 경제적이고 신뢰성 있는 풍력

- 1) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : ricky65@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
- 2) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : aerodon3@yahoo.co.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
- 3) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : consul7@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
- 4) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : aerocfd1@snu.ac.kr
Tel : (02)880-9346 Fax : (02)887-2662
- 5) 세종대학교 기계항공우주공학부
E-mail : kntlee@sejong.ac.kr
Tel : (02)3408-3285 Fax : (02)3408-3333
- 6) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : donghlee@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7386 Fax : (02)887-2662

는 특징은 풍력발전기의 대형화라고 할 수 있으며, 경제적인 측면에서 경쟁력 있는 풍력발전기의 규모는 1~3MW급으로 판명됨에 따라 미국을 비롯한 선진국에서는 1MW급 이상 3~5MW급의 초대형 풍력발전의 개발연구가 진행되고 있다. 해상풍력은 해안에서 일정거리의 바다 위에 대용량의 풍력발전기를 설치하여 전기를 생산하는 것으로서 육상에 비해 풍속, 풍향 분포가 균일하고, 바람의 난류와 전단력이 낮으며 초대형 풍력발전을 위한 대형 부지확보가 용이하다. 또한 소음, 그림자, 전파방해 등의 거주환경과 관련된 제한조건이 거의 없다. 최근에는 세계의 15개국이 해상 풍력발전 단지를 구상하고 있다. 아직까지 서유럽이 주된 시장으로 전체 계획의 약 79%를 차지하고 있다.

바람이 가지는 운동에너지를 필요한 동력으로 전환시키는 로터 블레이드는 풍력발전 시스템의 효율을 결정짓는 중요한 부분이다. 본 연구에서는 한반도 주변 해안의 평균풍속을 이용하여 국내 풍력 자원에 맞는 수평축 해상풍력터빈 블레이드를 최적 설계하기 위한 알고리즘을 구현하고 최적형상에 대해서 탈설계점 해석을 수행하였다.

2. 한국형 해상풍력터빈 블레이드 개념설계

본 연구에서 개발하고자 하는 해상풍력발전 시스템의 개요는 그림 1과 같다.

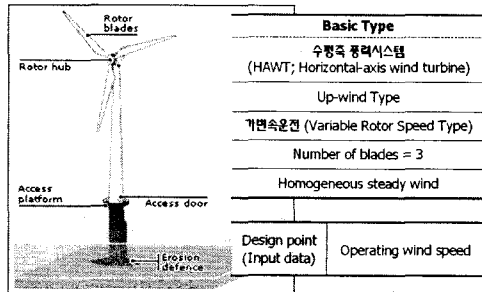


Fig. 1 해상 풍력터빈의 개략도

2.1 국내 연안의 평균 해상 풍속

막대한 비용이 소요되는 해상풍력발전의 건설을 위해서는 설치하고자 하는 지역에 대한 풍속, 풍향자료의 수집과 분석이 반드시 필요하다. 육상에 비해 해상에서의 풍향자료는 직접적으로 측정하기가 어려우므로 다음과 같은 방법으로 풍향 평가를 한다.

- Mesoscale 기상예측
- 해변의 기상탑으로부터의 예측
- 해상 기상탑 운용
- 인공위성 측정자료 분석

이 중에서 NASA의 ADEOS II QuikSCAT 위성에 의해 측정된 국내 해상풍력자원을 분석한 결과를 평균풍속으로 설정하였고, 그림 2에서 해면으로부터 60m 높이에서 계산된 국내 연안의 평균풍속을 나타내었다⁽¹⁾. 남쪽 해역과 제주도에도 해상풍력을 설치한다고 가정하면 해상풍력터빈에 적절한 평균풍속을 10m/s로 설정하였다.

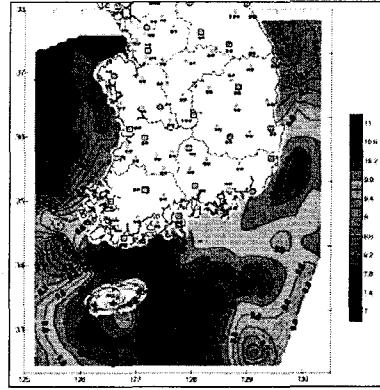


Fig. 2 QuikSCAT 위성에 의해 측정된 한반도 주변 해안의 평균풍속 분포[m/s]⁽¹⁾

2.2 설계변수와 초기 설계공간의 설정

식(1)의 60m 높이(h_1)에서 보정된 평균풍속 (U_{h_1})을 식(2)의 Power law model을 사용하여 블레이드 허브 높이(h)로 다시 보정하였다. 여기서 α 는 풍속분포지수로서 해상이나 사막과 같은 평평한 지형에서는 0.1로 가정한다.

$$U_{h_1} = 10 \text{ [m/s]} \quad (h_1 = 60 \text{ [m]}) \quad (1)$$

$$U_h = U_{h_1} \times \left(\frac{h}{h_1}\right)^\alpha \quad (2)$$

일반적으로 허브의 높이는 풍력터빈 블레이드의 지름과 같게 설계하지만, 해상의 경우 바람의 전단력이 낮기 때문에 블레이드의 허브 높이는 식(3)과 같이 블레이드 지름의 75%로 설계하였다.

$$h = 0.75 \times D \quad (3)$$

블레이드 지름(D)의 초기 설계공간은 동력계수 (C_p)에서 유도할 수 있으며, C_p 는 Betz의 한계를 고려하여 그 범위를 설정하였다.

$$\frac{1}{2} \leq C_p = \frac{2P}{\rho U_\infty^3 \pi R^2} \leq \frac{16}{27} \quad (4)$$

$$D = \sqrt{\frac{8P}{\rho U_\infty^3 \pi C_p}} \quad (5)$$

$$P = 3 \text{ [MW]} \quad (6)$$

Tip speed ratio(λ)에서 축 회전수(rpm)를 유도하였다. λ 의 초기 설계공간은 3개의 블레이드를 가지는 lift 형 풍력터빈에서 가장 큰 동력계수를 발생시키는 범위를 설정하였다.

$$6 \leq \lambda = \frac{R\Omega}{U_\infty} \leq 10, \quad \Omega = 2\pi \frac{rpm}{60} \quad (7)$$

$$rpm = \frac{60 U_\infty^3 \lambda}{\pi R} \quad (8)$$

3. 설계 최적화 기법과 해석

3.1 풍력터빈 블레이드 최적화 기법

설계과정에서 사용된 각 수준별 설계변수와 설

계점을 표 1에서 나타내었다. 평균풍속(U_∞)과 원하는 출력의 동력(P)을 설계점으로 하고, 1차 수준의 설계변수 그룹은 블레이드 지름(D)과 축회전수(rpm)로 설정하였다. 그리고 반경 방향에 따른 블레이드 각 단면의 시위 길이(c)와 비틀림각(β)을 2차 수준의 설계변수로 설정하였다.

Table 1 Design parameter의 정의

Design variables	1 st level group	blade diameter, rotational speed(rpm)
	2 nd level group	pitch angle, chord length at the each blade section
Design points	rated wind speed, power output	

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

Table 2 각 설계변수 그룹별 설계최적화 기법

1 st level group	DOE, RSM, SQP, Probability Method
2 nd level group	Minimum Energy Loss Method

풍력터빈 블레이드 설계를 위해서 첫 번째 수준 설계변수에 3k Full factorial experimental designs를 적용하여 실험점 개수를 설정하였다. 또한 설계변수의 변화에 따른 목적함수의 변화를 설계공간에서 모델링하여 반응면을 구성하고, 반응면상의 최적화를 수행하는 반응면 기법을 적용하였다⁽²⁾.

구성된 첫 번째 수준의 설계변수 영역에서 각 제약조건을 충족시키면서 추진효율을 최대화하는 설계점을 구하기 위해서 국부최적화 이론인 SQP (Sequential Quadratic Programming)⁽³⁾을 적용하였다.

1차 수준의 설계변수에 대한 목적함수와 제약조건의 한계는 다음과 같다.

$$\text{Maximize } \eta_F(\bar{x})/C_T(\bar{x}) \quad (9)$$

$$\text{Subject to } 6 \leq \lambda(\bar{x}) \leq 10 \quad (10)$$

$$\sigma(\bar{x}) \geq 0.0345 \quad (11)$$

$$M_{tip}(\bar{x}) \leq 0.19 \quad (12)$$

$$C_p(\bar{x}) \leq 0.59 \quad (13)$$

$$\bar{x} = [D, RPM]^T \quad (14)$$

여기서, 풍력터빈 블레이드의 효율과 성능계수는 다음과 같다.

$$\eta_F = \frac{27}{16} C_P \quad : \quad \text{Froud efficiency} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad : \quad \text{tip-speed ratio} \quad (16)$$

$$\sigma = \frac{B \int c(r) dr}{\pi R^2} \quad : \quad \text{solidity} \quad (17)$$

$$C_P = \frac{2P}{\rho V^3 \pi R^2} \quad : \quad \text{power coefficient} \quad (18)$$

$$C_T = \frac{2T}{\rho V^2 \pi R^2} \quad : \quad \text{thrust coefficient} \quad (19)$$

블레이드 끝의 마하수(M_{tip})는 육상풍력과 같이 소음의 영향과 압축성 효과를 방지하는 0.19 이하로 제약조건을 가정했지만⁽⁴⁾ 해상에서는 소음의 영향이 덜하기 때문에 압축성 효과만 고려하는 0.3까지 확대할 수 있다.

초기 설계공간 내에서는 모든 제약조건을 만족하는 설계결과가 타당한 성공확률이 높은 영역이 있는 반면에 낮은 영역도 혼재되어 있다. 따라서 초기 설계공간에서 성공확률이 낮은 영역을 제외한 후 성공확률을 높임으로써 설계공간에 대한 타당성을 향상시킬 수 있다. 이를 위해 joint probability 개념과 반응면 기법, 그리고 Monte Carlo Simulation을 이용하였다. 또한 주어진 설계공간보다 성공확률이 높은 영역으로의 이동을 위해 Chebyshev Inequality를 이용했다^(5,6).

운동량 이론과 블레이드 요소 이론을 혼합하여 블레이드 형상 설계에 적용될 에너지 손실을 최소화하기 위한 설계 조건은 Betz에 의해 제시되었다. 2차 수준의 설계변수의 최적설계를 위해서 Adkins 등⁽⁷⁾의 최소에너지손실 기법을 풍력터빈 블레이드 설계에 적용하였다⁽⁸⁾.

그림 3에서 풍력터빈 블레이드의 전체설계과정을 나타내었다.

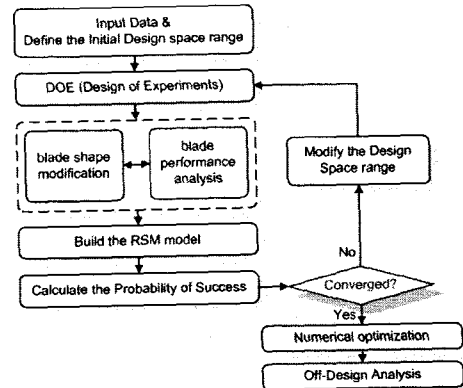


Fig. 3 풍력터빈 블레이드 전체 설계과정

3.2 블레이드 익형의 공력성능 해석

본 연구에서 각 단면의 블레이드 익형의 유동해석에 이용된 XFOIL⁽⁹⁾은 아음속 정상유동의 익형 주위의 비점성과 경계층을 포함하는 점성영역이 결합된 유동을 해석한다. XFOIL은 선형 와도 패달법을 이용하는 비점성 자유흐름과 경계층과 천이식을 포함하는 점성유동장을 global newton method에 의해 동시에 계산하므로 다른 점성수치기법에 비해 상당히 빠른 시간 내에 해석이 이루어진다.

블레이드 단면에 적용된 익형은 NREL에서 개발된 S818, S830, 그리고 S831 익형으로서 형상은 그림 4와 같다^(10,11).

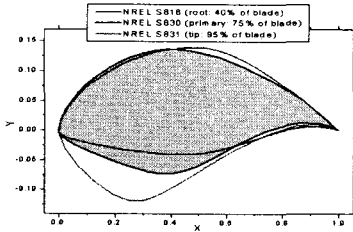


Fig. 4 NREL의 swept-tip 풍력터빈용 블레이드 단면 의형(10,11)

4. 해상풍력터빈 블레이드 설계결과

4.1 1차 수준의 설계변수의 최적설계결과

1차 수준의 설계변수인 운용범위 내에서 설계된 최적형상의 목적함수값과 제약조건의 반응면 분포를 그림 5에서 나타내었다. 설계운용범위 내에서 블레이드 지름이 감소할수록 목적함수값은 증가하였다. 제약조건은 설계공간 내의 설계변수에 따라 선형적으로 거의 증가하거나 감소한다. 최종설계공간은 초기영역에서 크게 벗어나지는 않지만 성공확률이 증가하는 방향으로 축소되었다.

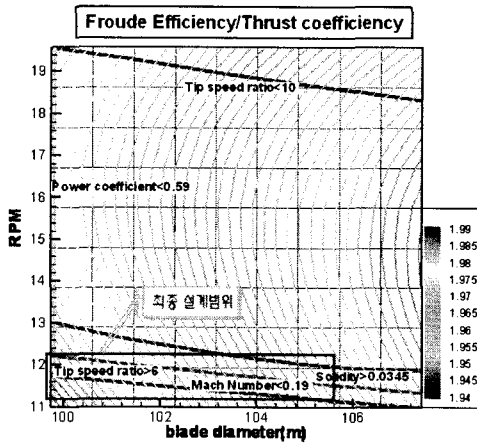
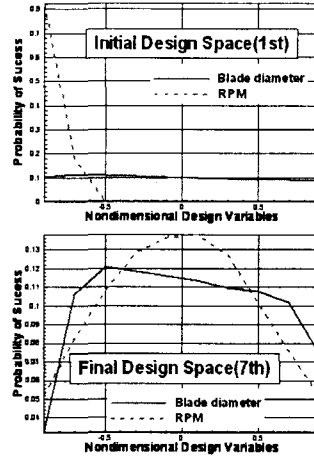


Fig. 5 초기 설계영역과 최종 설계영역 내의 목적함수와 제약조건 함수 분포

계산된 목적함수값의 중간값인 1.95를 기준으로 모든 제약조건을 만족하는 성공확률을 그림 6에서 나타내었다. 설계영역 내에서 각각의 설계변수에 대해 동일한 발생확률을 주는 균등분포로 가정해 Monte Carlo Simulation을 한다. 반응면을 구성할 경우 실제 해석코드를 대신 이용하므로 계산시간이 매우 빠르다. 따라서 가능한 많은 표본이 있을수록 정확하므로 1,000,000개의 표본을 수행시켰다.



(a) 초기 설계공간의 확률분포 (4.74% 성공확률)

(b) 최종 설계공간의 확률분포 (43.46% 성공확률)

Fig. 6 설계공간 내 설계변수의 확률분포

초기 설계공간의 성공확률 4.47%에서 성공확률의 증가가 1%내로 수렴되는 7번의 설계공간의 이동 후 43.46%로 향상시킬 수 있었다. 수렴된 최종 설계공간 내의 설계변수의 분포도 정규분포에 가까워졌음을 알 수 있다.

4.2 최적설계 형상의 성능 해석

평균풍속 10m/s에서 3MW의 요구동력 설계조건에서 모든 제약조건을 만족하고 목적함수를 최대로 하여 설계된 풍력터빈 블레이드 형상의 각 설계 매개변수들을 표 3에서 나타내었다.

Table 3 풍력터빈 블레이드 최적 설계변수

Design Parameter		Designed blade
Design conditions	Wind speed(h=60m)	10 m/s
	Power Output	3 MW
Design variables	Blade diameter	99.81 m
	Shaft speed(RPM)	11.74 rev/min
Objective	Froude efficiency	1.9851
	Thrust coefficient	
Constraints	Tip speed ratio	6
	Tip Mach Number	0.1828
	Solidity	0.0408
	Power coefficient	0.59

풍력터빈 블레이드의 무차원화된 블레이드 반경방향에 따른 최적화된 2차 수준의 설계변수인 시위길이와 피치각 분포를 그림 7에서 나타내었다. 그림 8은 블레이드 각 단면의 추력과 동력계수 분포로서 블레이드의 반경방향의 75~85% 부근에서 가장 높게 발생하였다.

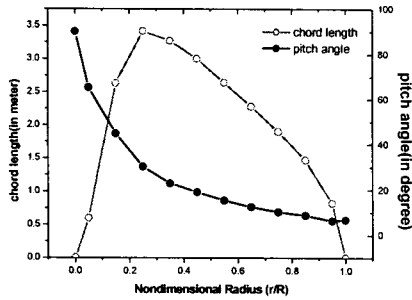


Fig. 7 변경방향에 따른 시위길기와 레이놀즈수 분포

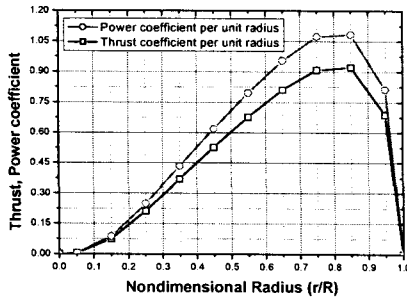


Fig. 8 변경방향에 따른 추력과 동력계수 분포

4.3 탈설계점 성능 해석

최적설계된 풍력터빈 블레이드 형상에 대해서 실제 풍력터빈이 운용되는 풍속과 축회전수의 범위 내에서 탈설계점 성능해석 결과를 그림 9와 10에서 나타내었다.

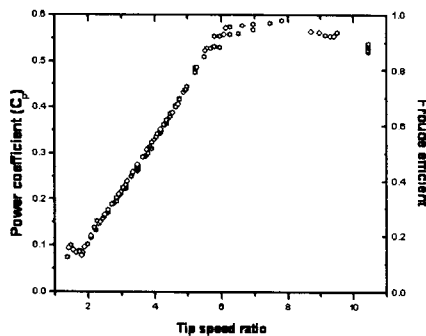


Fig. 9 Tip-speed ratio에 따른 Froude 효율 분포

풍속과 축회전수를 포함하는 Tip-speed ratio에 따른 Froude 효율 분포를 나타낸 그림 9에서 보면 Tip-speed ratio가 6~8 정도일 때 가장 좋은 효율을 보였다. 그림 10은 운용풍속에 따른 발생 동력을 각각의 축회전수에 따라 함께 나타낸 것이다. 설계 요구조건인 3MW의 동력을 발생시키기 위해서 풍속이 증가할수록 낮은 rpm의 축회전수를 갖는 것을 알 수 있다.

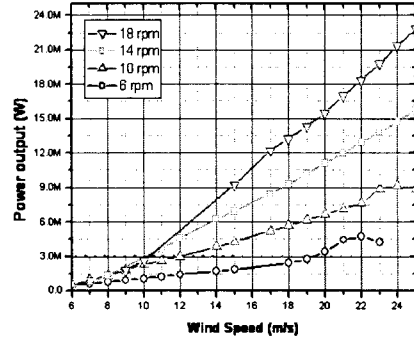


Fig. 10 Rotational speed와 Wind speed에 따른 발생 동력

5. 결론

본 연구에서는 국내 해안의 풍력 자원을 고려한 설계범위 내의 설계요구조건과 제약조건을 만족하면서 최대 목적값을 가지는 해상풍력터빈 블레이드의 최적설계 형상 도출하고, 블레이드 최적형상의 탈설계점 성능해석을 위한 알고리즘과 설계툴을 구성하였다. 이를 위해 많은 수의 변수를 효율적으로 구성하기 위해서 각 수준별로 변수 그룹을 설정하였고 각 변수별로 다른 설계기법을 적용함으로써 프로그램의 효율성을 높였다. 1차 수준 설계변수의 이동을 통해 설계공간의 타당성 향상시켰고, 각 설계점에서 제약조건을 만족하는 최대 목적값에서 1차 수준과 2차 수준의 설계변수값을 도출하였다.

차후 국내의 풍력 자원 조건에서 높은 성능을 낼 수 있는 단면 익형 설계와 유동제어기법을 이용한 공력성능 향상이 이루어질 것이다. 또한 풍력터빈에 작용하는 공력하중의 해석을 통해 풍력터빈의 블레이드 공탄성 해석을 비롯한 타워, 허브, 너셀 등의 구조물에 대한 구조해석 등을 통해 다분야통합 최적 설계기법에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 서울대학교 BK21 차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단과 한국과학재단 지정 최적설계기술연구센터의 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 깊이 감사드립니다.

References

- [1] 경남호, 윤경은, 장문석, 장동순, 2003, "한반도 해역의 해상 풍력 자원 평가", 한국태양에너지학회지, 제23권, 제2호, pp.35-41
- [2] Myers, R.H, Montgomery, D.C, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & Sons, New York, Ny, 1995
- [3] Vanderplaats, G.N., 1999. "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", Vanderplaats Research & Development, Inc.
- [4] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, 2001, "Wind Energy

- Handbook", John Wiley & Sons, LTD
- [5] D. N. Mavris, O. Bandte and D. A. DeLaurentis, 1999, "Determination of System Feasibility and Viability Employing a joint Probabilistic Formulation," AIAA-99-0183
 - [6] Yong-Hee Jeon, Eung-Soon Park, Yushin Kim, Sangook Jun, Yo-Chon Ku, Dong-Ho Lee, 2004, "Feasibility Improvement of the Design Space Using Probabilistic Method", AIAA-2004-0537
 - [7] Charles N. Adkins, Robert H. Liebeck, 1994, "Design of Optimum Propellers," Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 5, pp. 676~682.
 - [8] 이기학, 김태운, 김규홍, 이경태, 이동호, 2005, "한국형 해상 풍력터빈 블레이드 최적 설계 알고리즘 연구", 한국신재생에너지학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp.47-50.
 - [9] Drela. M., 1989, "XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoil," Low Reynolds Number Aerodynamics, Springer-Verlag, New York, pp. 1~12.
 - [10] Dan M. Somers, 2005, "The S830, S831, and S832 Airfoils", NREL/SR-500-36339
 - [11] Dan M. Somers, 2004, "The S816, S817, and S818 Airfoils", NREL/SR-500-36333