

효율적인 2단계 최적화를 통한 3차원 해상풍력터빈 블레이드 설계

이 기학¹⁾, 홍 상원²⁾, 정 지훈³⁾, 김 규홍⁴⁾, 이 동호⁵⁾, 이 경태⁶⁾

Three-Dimensional Offshore Wind Turbine Blade Design by using Efficient Two Step Optimization

Ki-Hak Lee, Sang-Won Hong, Ji-Hoon Jeong, Kyu-Hong Kim, Dong-Ho Lee, and Kyung-Tae Lee

Key words : Offshore HAWT(해상용 수평축풍력터빈), XFOIL, Minimum Energy Loss Method(최소에너지손실방법), Design of Experiments(실험계획법), Response Surface Method(반응면기법), Sequential Quadratic Programming(순차이차계획법), Probability Method(확률적 방법), Optimization(최적화)

Abstract : 본 연구의 목적은 3차원 풍력터빈 블레이드 최적형상설계를 위한 실용적이고 효율적인 설계 과정을 구현하는 것이다. 국내 연안의 해상풍력에 적용하기 위해서 통계적 모델을 이용하여 풍황 자료를 분석하였다. 설계에 관련된 많은 수의 설계변수를 효과적으로 관리하기 위해서 설계과정은 운용조건 최적화와 블레이드 형상설계의 2단계로 구성하였다. 실험계획법에 의해 추출된 각 운용조건점은 형상설계를 위한 입력값으로 제공된다. 형상설계 단계에서는 최소에너지손실 조건과 결합된 BEMT를 이용하여 각 블레이드 단면에서의 시위길이와 피치각 분포를 최적화하였다. 블레이드 단면 익형은 NREL S830을 이용하였고, 익형의 공력성능은 XFOIL을 이용하여 예측하였다. 설계된 블레이드 형상의 성능해석을 수행하고 그 결과를 바탕으로 반응면을 구성하였다. 좀 더 나은 성능을 가진 블레이드 형상을 찾기 위해서 초기설계공간에서 확률적 방법을 이용하여 타당성 있는 설계공간까지 운용조건 설계변수를 이동시키고 구배최적화 기법을 통해 각각의 제약함수를 만족하면서 연평균발생에너지를 최대로 하는 최적블레이드 형상을 구현하였다. 제시된 최적설계과정은 풍력터빈블레이드 개발에 실용적이고 신뢰성 있는 설계툴로서 사용이 가능하다.

1. 서 론

오늘날의 풍력기술개발목표 중 가장 두드러지는 특징은 3 MW급 이상의 풍력발전기의 대형화라고 할 수 있다. 이에 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.

바람이 가지는 운동에너지를 필요한 동력으로 전환시키는 로터 블레이드는 풍력발전 시스템의 효율을 결정짓는 중요한 부분이다. 같은 용량을 가진 풍력터빈 시스템이지만 설치지점의 풍황 조건에 따라 여러 사양의 풍력터빈 블레이드 시스템이 설계되어야 한다. 이러한 블레이드의 설계방법은 역설계법과 수치최적화법이 있다. 이 중 수치최적화법은 설계과정의 수렴을 위해 엄청난 시간과 계산용량이 소요되고, 특히 3차원 유동장의 해석을 위해 CFD와 같은 해석기법을 이용할 경우 기하급수적으로 증가한다.⁽¹⁾ 수치최적화방법에 비해 역설계법은 계산과

정의 반복과 수렴에 상대적으로 적은 시간이 소요되는 장점이 있다. 본 논문에서는 최소에너지손실조건을 위한 Prandtl과 Betz의 설계이론⁽²⁾을 운동량이론과 깃요소이론을 결합한 BEMT(Blade Element and Momentum Theory)⁽³⁾에 적용한 역설계법⁽⁴⁾을 이용하였다. 그러나 역설계법도 운용조건과 제약조건을

-
- 1) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : ricky65@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 2) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : consul7@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 3) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : ssn557@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 4) 서울대학교 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소
E-mail : aerocfd1@snu.ac.kr
Tel : (02)880-9346 Fax : (02)887-2662
 - 5) 서울대학교 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소
E-mail : donghlee@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7386 Fax : (02)887-2662
 - 6) 세종대학교 기계항공우주공학부
E-mail : kntlee@sejong.ac.kr
Tel : (02)3408-3285 Fax : (02)3408-3333

포함하는 설계과정에 대해서는 제한을 가지므로, 이러한 조건을 고려할 수 있는 수치최적화방법과의 결합을 통해 블레이드의 형상설계 뿐만 아니라 운용 조건최적화에서도 향상된 설계과정이 필요하다.

본 연구의 목적은 국내 풍황 조건에 맞는 한국형 수평축 해상풍력터빈에서 발생하는 에너지를 최대화하고, 운용조건과 블레이드 형상을 빠른 시간 내에 최적화 할 수 있는 효과적인 설계알고리즘을 구현하는 것이다.

2. 해상풍력터빈 블레이드 개념설계

본 연구에서 개발하고자 하는 해상풍력발전시스템의 개요는 그림 1과 같다.

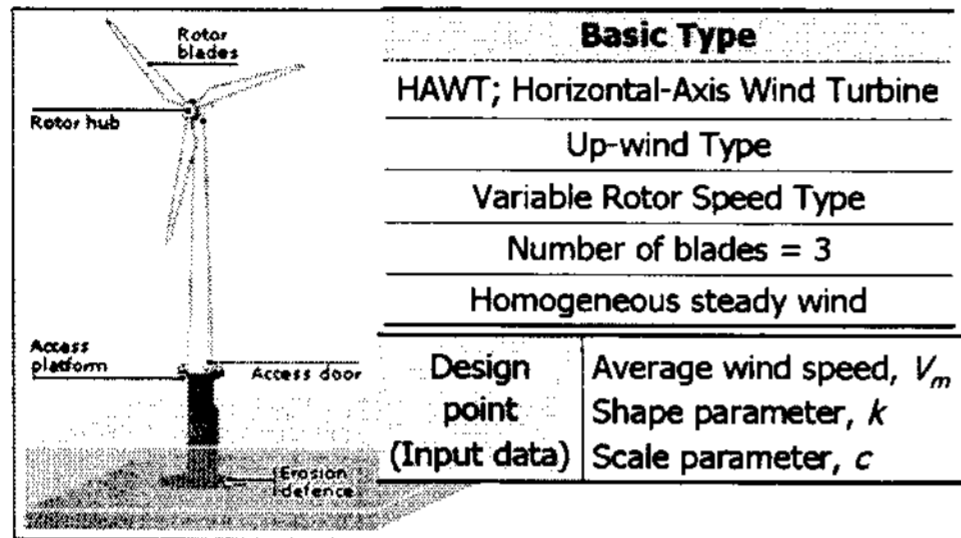


Fig. 1 해상 풍력터빈의 개략도⁽⁷⁾

2.1 목적함수와 제약조건

본 논문의 목적함수는 풍력터빈에서 발생하는 연간에너지생산량을 최대로 하는 것이다. 발생동력(P)과 풍속확률분포함수(f)를 이용하여 연평균발생동력, $\bar{P}(\bar{V})$ 을 구할 수 있고, 이는 연간에너지생산량과 비례한다.

$$\bar{P}(\bar{V}) = \int_{V_{min}}^{V_{max}} P(V) f(V) dV \quad (1)$$

여기서 V 는 순간풍속이며, 등급계수(c)와 형상계수(k)로서 특성 지어지는 Weibull 확률분포, $f(V)$ 는 다음과 같다.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (2)$$

블레이드의 설계와 성능해석을 위해서 첫 번째로 고려해야 할 제약조건은 solidity(σ)로서, 전체 회전 단면적에 대한 실제 블레이드 면적의 비로서 정의된다. 3개의 블레이드 시스템에서 solidity는 0.0345 이상의 값을 가진다.⁽⁷⁾

$$\sigma \geq 0.0345 \quad (3)$$

블레이드 끝에서의 속도는 해상용에서 소음과 압축성 효과 등을 고려하여 0.3 이하로 제한하였다.

$$M_{tip} \leq 0.30 \quad (4)$$

2.2 설계변수와 초기 설계공간의 설정

설계과정에서 사용된 각 단계별 설계변수를 표 1에서 나타내었다.

Table 1 블레이드를 위한 설계변수의 정의와 분류

설계단계	설계변수(DV)	#of DV
Step 1. System optimizer	운용조건 최적화 x_1 : 블레이드 지름, D x_2 : 회전수, rpm	2
Step 2. Subspace optimizer	형상설계 x_3 : 시위길이, $c(r)$ x_4 : 비틀림각, $\beta(r)$	11 11
	성능해석 및 최적화 x_5 : 순간 풍속, V x_6 : 순간 회전수, rpm	31 31

블레이드 지름(D)의 초기범위는 동력계수(C_p)에서 유도하고, 축 회전수(rpm)는 tip speed ratio(λ)에서 유도하였다.

$$0.40 \leq C_p \leq 0.45 \quad (5)$$

$$6 \leq \lambda \leq 9 \quad (6)$$

2.3 한반도 연안에서의 풍황 평가

해상풍력터빈 설치를 위한 통계적 분석⁽⁸⁾과 입지선정 최적화 연구를 수행하여 한반도 연안에서 가장 에너지밀도가 크고, 30 m 이하의 수심과 해안선에서 5km 이상의 거리를 가지는 위치를 선정하였다. 그 결과로서, 블레이드 설계를 위한 입력변수로서 이용될 풍황 자료는 표 2에서 나타내었다.

Table 2 블레이드 설계를 위한 풍황 자료

Design Parameters	Result	
design variables	Longitude (x_1) Latitude (x_2)	128.61° 34.57°
objective	Max. Energy density, P [W/m ²]	447.74
find	Scale parameter, c [m/s]	8.44
	Shape parameter, k	2.19
	Average wind speed, V_m [m/s]	7.48
constraints	Depth of water [m]	30.
	Distance to shore [km]	16.41

3. 설계 최적화 기법

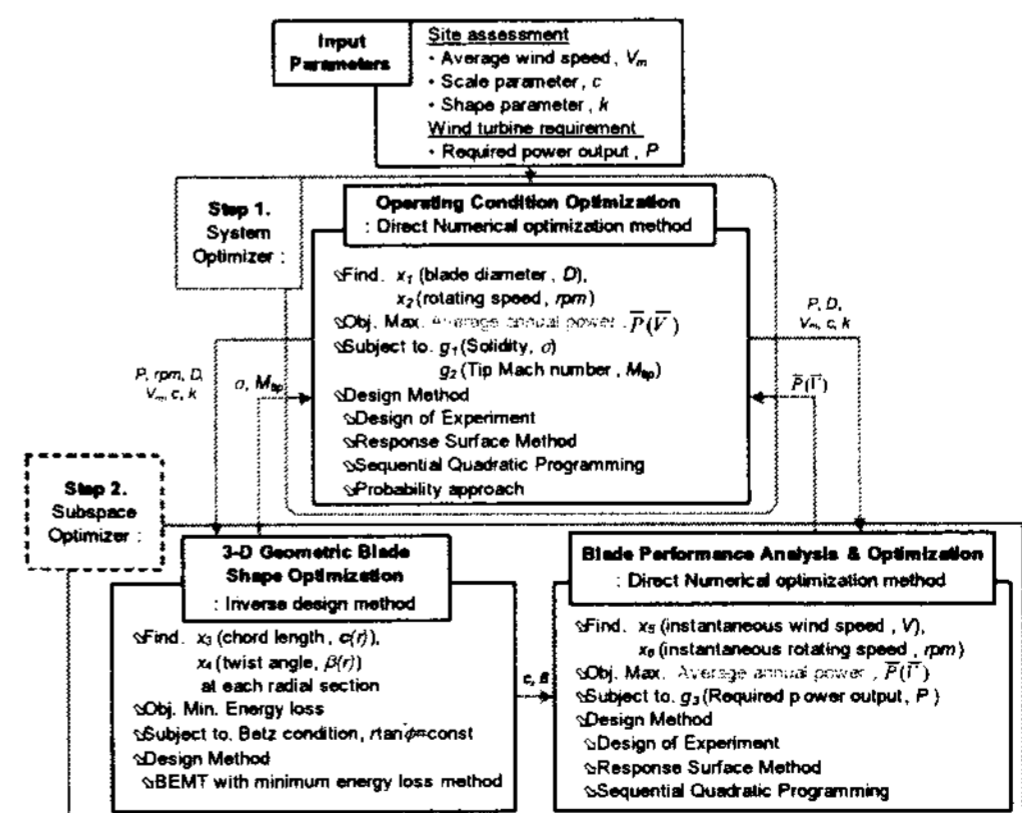


Fig. 2 풍력터빈 블레이드를 위한 2단계 설계최적화

풍력터빈 블레이드 설계에 적용된 각 단계별 개요를 그림 2에서 나타내었다.

3.1 Step 1: System Optimizer

풍력터빈 블레이드 설계를 위해서 1단계 설계변수에 3k Full factorial 실험계획법(DOE)을 적용하여 실험점을 설정하였다. 또한 설계변수의 변화에 따른 목적함수와 제약함수의 변화를 모델링 하여 3차 반응면(RSM)을 구성하였다⁽⁹⁾.

구성된 설계변수 영역에서 각 제약조건을 충족시키면서 추진효율을 최대화하는 설계점을 구하기 위해서 국부최적화 이론인 SQP(Sequential Quadratic Programming)⁽¹⁰⁾을 적용하였다.

3.2 Step 1: System Optimizer

3.2.1 3차원 블레이드 형상 최적화

블레이드 형상의 최적설계를 위해서 Adkins 등⁽⁴⁾의 최소에너지손실 기법을 결합한 BEMT를 설계에 적용하였다. 각 단면의 블레이드 익형의 유동해석에서 XFOIL⁽¹¹⁾을 이용하였다. 아음속 정상유동의 익형 주위의 비점성과 경계층을 포함하는 점성영역이 결합된 유동을 해석한다. 블레이드 전체 단면에 적용된 익형은 NREL에서 개발된 S830 익형⁽¹²⁾이다.

3.2.2 블레이드 성능 해석과 최적화

형상 최적화 단계에서 설계된 블레이드는 운용범위 내에서 성능해석을 한다. 이 때 최대 발생동력을 구하기 위해 다음과 같이 문제를 정의한다.

$$\text{Maximize } \bar{P}(\bar{V}) = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} P(V)f(V)dV \quad (7)$$

Subject to

$$P(V) \leq 3MW \quad \text{for } 5 \leq V(m/s) \leq 20 \quad (8)$$

3.3 설계공간의 타당성 향상

초기설계공간 내에서는 모든 제약조건을 만족하는 타당성 있는 영역⁽¹³⁾이 있는 반면에 그렇지 않은 영역이 혼재되어 있다. 따라서 초기설계공간에서 성공확률이 낮은 영역을 제외한 후 성공확률을 높임으로써 설계공간에 대한 타당성을 향상시킬 수 있다. 이를 위해 joint probability 개념과 반응면 기법, 그리고 Monte Carlo Simulation(MCS)을 이용하였다.⁽¹⁴⁾ 또한 주어진 설계공간보다 성공확률이 높은 영역으로의 이동을 위해 Chebyshev Inequality를 이용하였다. 그림 3에서 풍력터빈 블레이드의 전체 설계과정을 나타내었다.

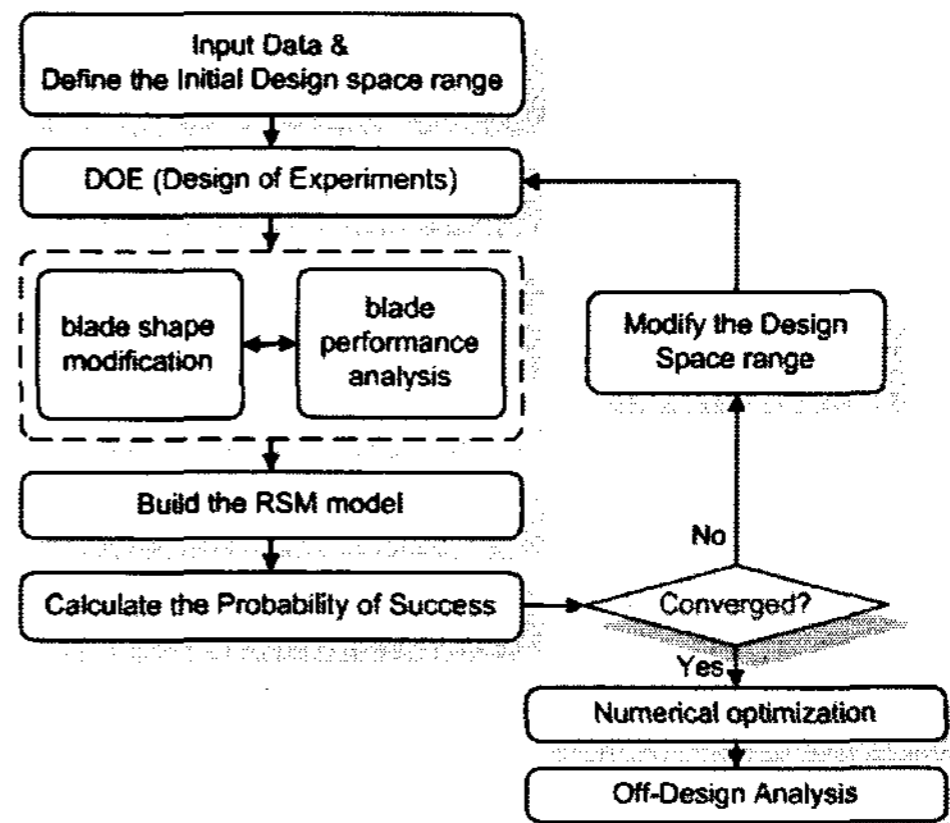


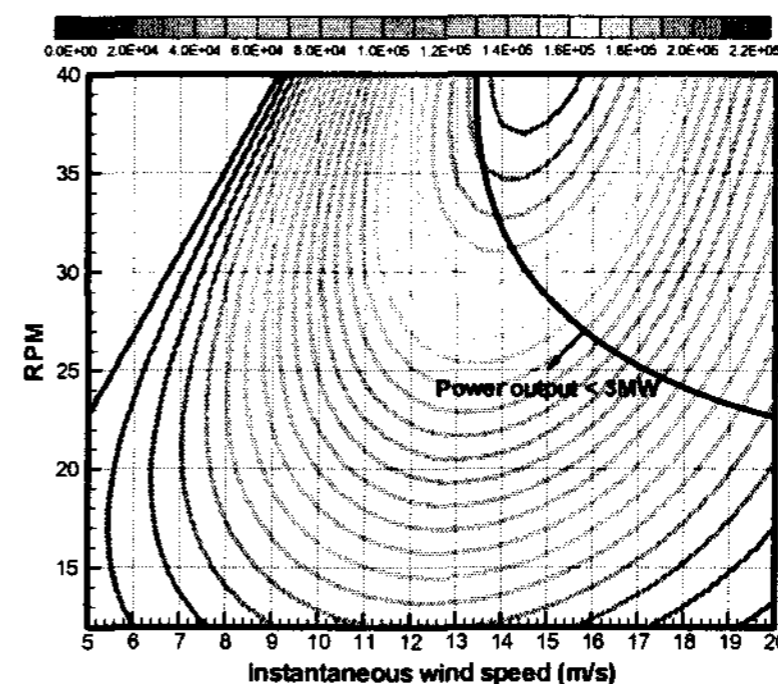
Fig. 3 풍력터빈 블레이드 전체 설계과정

4. 결과 및 토의

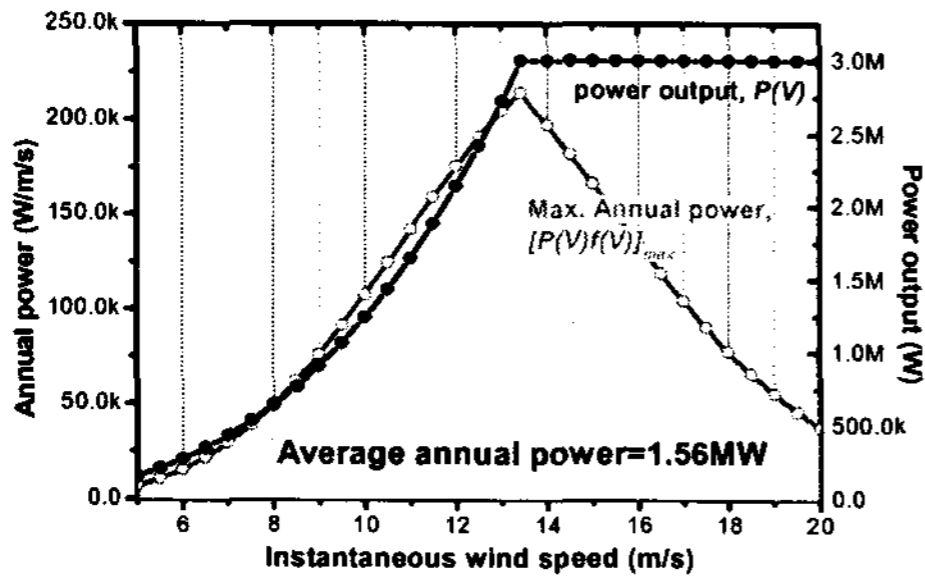
4.1 블레이드 성능해석과 최적화

1단계의 설계공간 내에서 DOE에 의해 추출된 실험점은 형상설계단계와 설계된 형상의 성능해석의 입력조건이 된다.

그림 4에서 $D=72.5$ m, $rpm=32.83$ 의 값을 가지는 실험점의 입력조건에서 설계된 블레이드 형상에 대한 성능 분포 예시를 나타내었다. 순간풍속의 증가에 따라 최대연발생동력은 점차적으로 증가한다. 그러나 요구동력 3 MW를 만족하는 rated wind speed에 도달하게 되면 3 MW 발생동력 제약조건을 만족하면서 감소한다.



(a) 연발생동력($P(V)f(V)$) 분포와 동력($P(V)$) 제약조건



(b) 순간풍속에 따른 발생동력($P(V)$)과 최대연발생동력($[P(V)f(V)]_{max}$) 곡선

Fig. 4 연발생동력($P(V)f(V)$)과 발생동력($P(V)$) 곡선 (예: $D=72.50$ m, $rpm=32.83$)

4.2 설계공간 타당성 향상을 통한 최적화

그림 5는 초기설계공간과 최종설계공간에서 1 단계의 목적함수와 제약조건들을 나타내었다. 초기 설계공간에서 제약조건들을 만족하는 설계변수의 국부최적점은 $D=76.28$ m, $rpm=24.26$ 이고, 최대 연평균발생동력, $\overline{P(V)}_{max}$ 값은 1.603 MW이다. 그러나 이 최적점의 위치는 초기설계공간 D 의 가장자리에 위치하고 있으므로, 확률적 접근방법을 이용한 설계공간의 변화에 따라 더 향상된 최대목적함수의 값을 가진 전역최적점을 찾을 수 있다.

초기설계공간에 비해서 최종설계공간의 rpm 의 범위는 감소하는 방향으로 많이 축소되었고, D 의 범위는 초기설계공간의 경계에서 증가하는 방향으로 많이 벗어나 있다. 최종설계공간에서 전역최적점은 $D=79.72$ m, $rpm=21.35$ 이고, $\overline{P(V)}_{max}$ 값은 1.612 MW에 도달하였다.

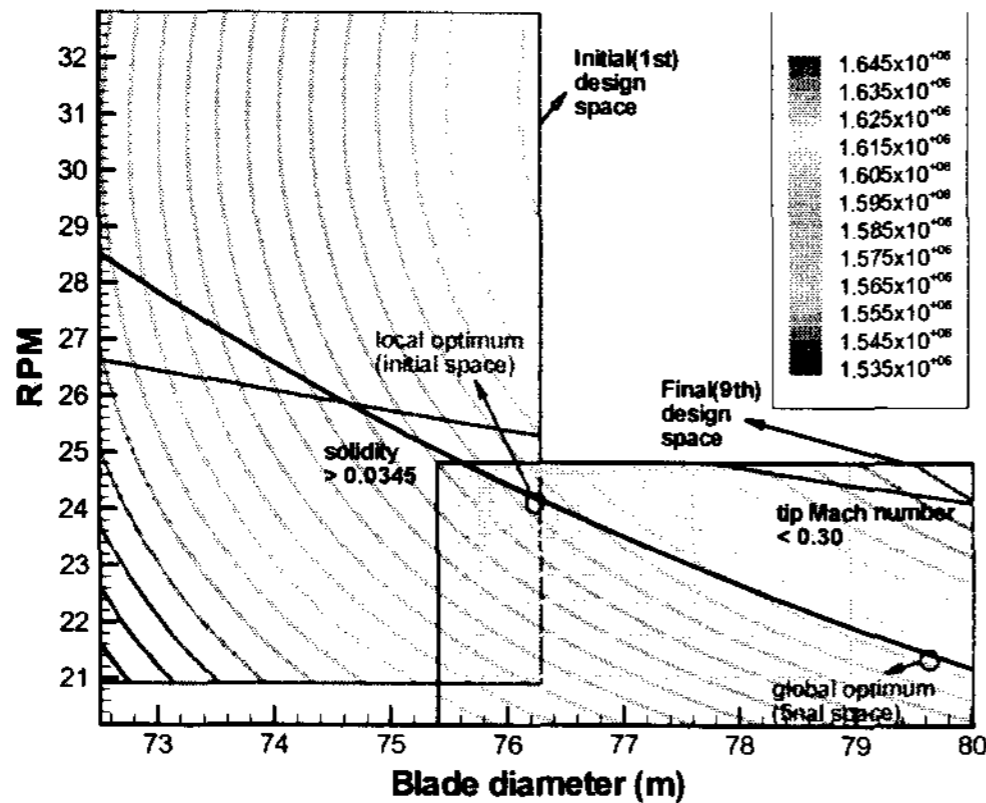


Fig. 5 설계범위내의 목적함수($\overline{P(V)}$)와 제약조건(σ , M_{tip}) 분포

그림 6에서 확률적 접근방법에 의한 설계공간의 변화를 나타내었다. 초기설계공간 내에서 각 제약조건을 만족시키는 타당성 영역은 좁은 영역에 국한되어 있다. 1단계 설계변수인 D 와 rpm 의 확률분포에 대한 평균은 각각 76.16 m, 24.17이다. 이 평균값

을 기준으로 양쪽으로 표준편차의 3배 범위로 설계공간을 이동시킨다. 9번의 최종설계공간의 이동 후, 성공확률의 분포는 초기설계공간에서보다 표준정규분포에 가까워짐을 알 수 있다.

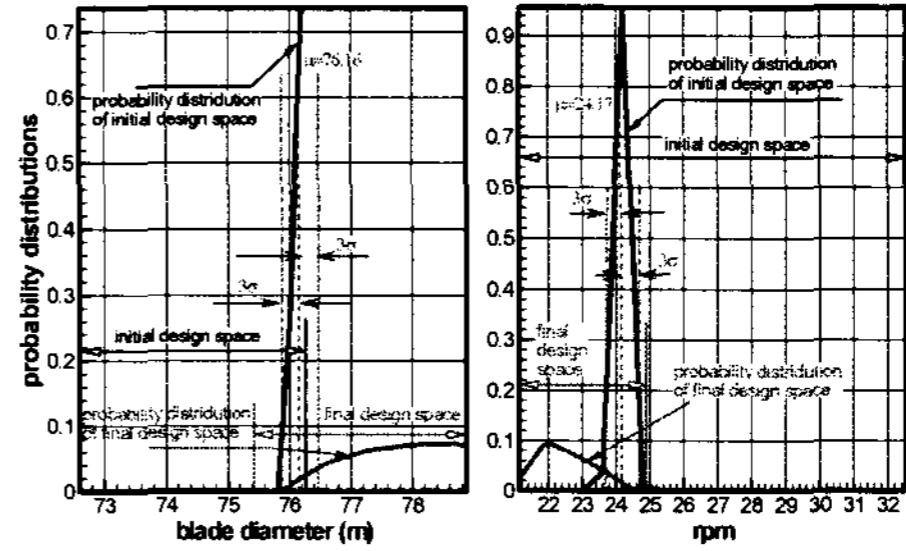


Fig. 6 운용조건 단계에서 설계변수의 확률분포

MCS를 이용하여 설계공간에서 모든 제약조건을 만족하는 타당한 영역의 성공확률을 계산하였다. 각 제약조건들의 누적확률분포함수를 그림 7에서 나타내었다. 초기설계공간에서 목적함수와 제약조건을 모두 만족하는 전체 성공확률은 0.17%이다. 최종설계공간에서 전체 성공확률은 16.14%로 증가하였다.

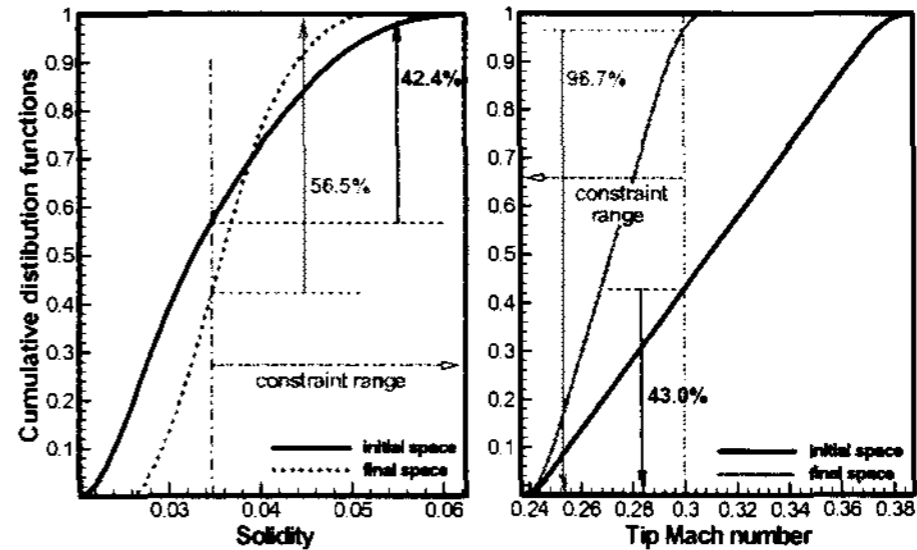


Fig. 7 설계제약조건들의 Joint CDF

4.3 블레이드 최적형상 비교

3 MW의 요구동력 설계조건에서 모든 제약조건을 만족하고 목적함수를 최대화하여 설계된 풍력터빈 블레이드 형상의 각 설계 매개변수들을 표 3에서 정리하였다. 전체 설계공간에서 제약조건은 M_{tip} 보다 σ 의 영향을 많이 받고 있다. 현재의 설계결과는 제약조건들의 변화에 따라 바뀔 수 있다.

초기설계공간 자체가 신뢰성 있는 데이터를 기반으로 합당하게 설정이 되었기 때문에 최종설계공간에서 최대목적함수의 값은 초기설계공간에 비해서 크게 증가하지 않았다. 그러나 설계공간의 타당성 향상을 통해서 초기설계공간 외에 새로운 설계공간에서 최적점을 찾을 수 있었다. 이는 초기설계공간의 설정단계에서 어떠한 정보도 없을 때 합당한 설계범위를 찾을 수 있는 유용한 방법이 될 수 있다.

후 기

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

References

- [1] Dornberger R, Stoll P, Büche D and Neu A, 2000, Multidisciplinary Turbomachinery Blade Design Optimization, AIAA Paper 2000-0838
- [2] Glauert H, 1948, The Elements aerofoil and airscrew theory; 2nd ed. Cambridge : Cambridge Univ. Press
- [3] Bet A. with appendix by Prandtl L. 1919, Screw propellers with Minimum Energy Loss. Göttingen Reports, pp. 193-213
- [4] Adkins C, N, and Liebeck R, H, 1984, "Design of Optimum Propellers", Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 5, pp. 676-682
- [5] 이기학, 주완돈, 홍상원, 김규홍, 이경태, 이동호, 2006, 설계공간 타당성 향상을 통한 한국형 해상풍력터빈 블레이드 최적형상설계 연구, 2006년 한국신재생에너지학회 춘계학술발표회
- [6] G. Richard Eisler, Paul S. Veers, 1998, Parameter Optimization Applied to Use of Adaptive Blades on a Variable Speed Wind Turbine, SAND report, SAND98-2668
- [7] Tony B, David S, Nick J, Ervin B, 2001, Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons
- [8] Sathyajith Mathew, 2006, Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer
- [9] Myers RH and Montgomery DC, 1995, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments; New York, John Wiley & Sons,
- [10] Vanderplaats GN, 1984, Numerical Optimization, Techniques for Engineering Design: With Applications; 3rd ed. New York: McGraw-Hill
- [11] Drela M, 1989, XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoil. Low Reynolds Number Aerodynamics, edited by Mueller, T. J., Springer-Verlag, New York, pp. 1-12
- [12] Somers DM, The S830, S831, and S832 Airfoils. NREL/SR-500-36339, August 2005
- [13] Arora J S, 1989, Introduction to Optimum Design. McGraw-Hill
- [14] Mavris DN, Bandte O and DeLaurentis DA. Determination of System Feasibility and Viability Employing a joint Probabilistic Formulation. AIAA Paper 99-0183, January 1999

Table 3 최적블레이드를 위한 설계결과

설계 매개변수	Designed Blade	
	초기설계공간	최종설계공간
설계조건	3 MW	
설계변수	D	76.29 m
	rpm	24.26
목적함수	$\overline{P}(\overline{V})$	1.603 MW
제약조건	σ	0.0333
	M_{tip}	0.288

초기와 최종설계공간에서 각각 최적화된 풍력터빈 블레이드의 형상을 그림 8에서 나타내었다. 초기설계공간에서의 설계된 최적형상에 비해서 최종설계공간에서 설계된 형상은 지름의 증가로 인해 반경방향으로의 시위길이 분포가 감소하였음을 알 수 있다.

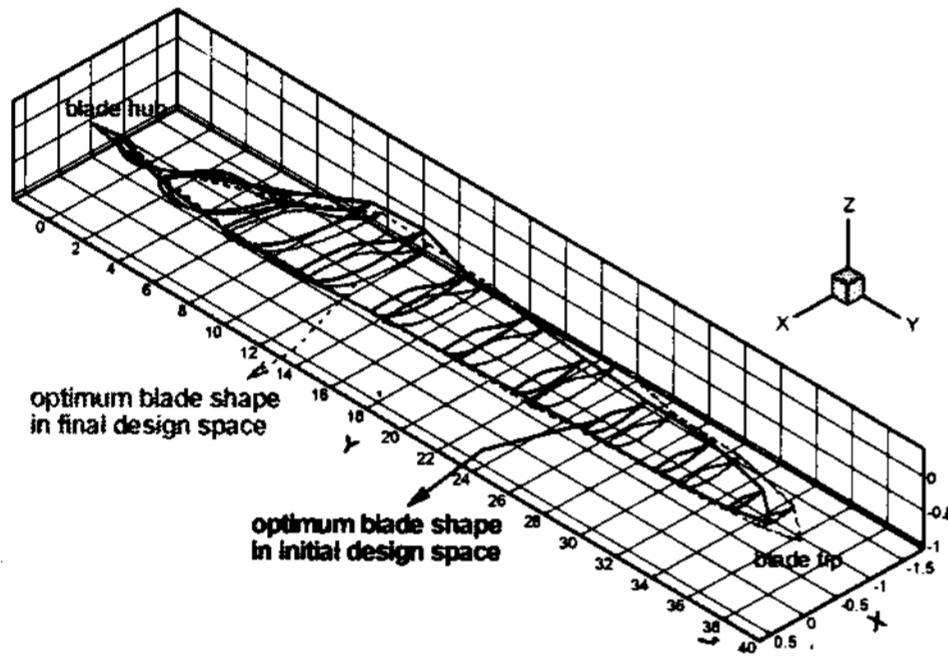


Fig. 8. 3차원 풍력터빈 블레이드의 최적형상 비교

5. 결 론

본 연구에서는 국내 연안의 해상풍력 자원을 고려하여 설계범위 내의 설계요구조건과 제약조건을 만족하면서 연평균동력을 최대 목적함수로 가지는 해상풍력터빈 블레이드의 최적설계 형상을 도출하였다. 또한 이러한 블레이드 최적형상설계를 위한 효율적인 2단계 설계알고리즘과 설계틀을 구성하였다. 이를 위해 많은 수의 변수를 효율적으로 구성하기 위해서 운용조건 최적화 단계와 형상설계 및 성능해석최적화 단계로 변수 그룹을 설정하였다. 그리고 각 변수 그룹별로 적합한 설계기법을 적용함으로써 프로그램의 효율성을 높였다.

또한 운용조건 최적화 단계의 설계변수의 전역 최적점을 찾기 위해서 설계공간의 이동을 통해 성공 확률을 증가시켰다. 최종설계공간에서 도출된 최적점은 $D=79.72$ m, $rpm=21.35$ 이고, 최대 연평균동력은 1.612 MW이다. 확률적 접근방법을 이용한 설계공간의 변화에 따라 더 향상된 최대목적함수의 값을 가진 전역최적점을 찾을 수 있다.

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