

# 효율적인 2단계 최적화를 통한 3차원 해상풍력터빈 블레이드 설계

이기학\*, 홍상원, 정지훈, 김규홍, 이동호, 이경태

## 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

**Abstract** 본 연구의 목적은 3차원 풍력터빈 블레이드 최적형상설계를 위한 실용적이고 효율적인 설계과정을 구현하는 것이다. 국내 연안의 해상풍력에 적용하기 위해서 통계적 모델을 이용하여 풍황자료를 분석하였다. 설계에 관련된 많은 수의 설계변수를 효과적으로 관리하기 위해서 설계과정은 운용조건 최적화와 블레이드 형상설계의 2단계로 구성하였다. 실험계획법에 의해 추출된 각 운용조건 설계점은 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 반용면을 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 연간에너지생산량을 최대로 하는 최적블레이드 형상을 구현하였다. 제시된 최적설계과정은 풍력터빈블레이드 개발에 실용적이고 신뢰성 있는 설계툴로서 사용이 가능하다.

**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)

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원  
 ■ E-mail : ricky65@snu.ac.kr ■ Tel : (02)880-8051 ■ Fax : (02)887-2662

### Nomenclature

a : sound speed, m/s	f(V) : Weibull probability distribution
B : number of blades	h : hub height, m
c : scale parameter, m/s	$h_{ref}$ : reference height (=10m), m
$c_{ref}$ : scale parameter at $h_{ref}$ , m/s	k : shape parameter
c(r) : chord length, m	$k_{ref}$ : shape parameter at $h_{ref}$
$C_p$ : power coefficient	M : Mach number
D : blade diameter, m	$M_{tip}$ : Mach number at the blade tip
	n : revolution per second, rps
	P : power output, watt

- P(V)f(V) : annual power, watt
- $\bar{P}(\bar{V})$  : average annual power, watt
- r : non-dimensional radial coordinate
- R : blade tip radius, m
- rpm : rotating speed
- V : instantaneous wind speed, m/s
- $V_{Emax}$  : velocity contributing maximum energy, m/s
- $V_m$  : average wind speed, m/s
- $V_r$  : rated wind speed, m/s
- x : design variables
- $\beta(r)$  : twist angle, degree
- $\lambda$  : tip speed ratio
- $\mu$  : mean value
- P : air density, kg/m<sup>3</sup>
- $\sigma$  : standard deviation
- $\sigma_t$  : total integrated solidity
- $\Omega$  : rotor angular velocity

## 1. 서론

오늘날의 풍력기술개발목표 중 가장 두드러지는 특징은 발전단가를 줄이고, 대용량의 전기에너지를 확보할 수 있는 3 MW급 이상의 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 시스템이라도 설치지점의 풍황 조건에 따라 여러 사양의 풍력터빈 블레이드 시스템이 설계되어야 설치지점의 연간에너지생산량을 최대로 이끌어 낼 수 있다. 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.<sup>1)</sup> 수치최적화방법에 비해 역설계법은 계산과정의 반복과 수렴에 상대적으로 적은 시간이 소요되는 장점이 있다. 본 논문에서는 최소에너지손실조건을 위한 Prandtl과 Betz의

설계이론<sup>2)</sup>을 운동량이론과 깃요소이론을 결합한 BEMT(Blade Element and Momentum Theory)에 적용한 역설계법<sup>3,4)</sup>을 이용하였다. 그러나 역설계법도 운용조건과 제약조건을 포함하는 설계과정에 대해서는 제한을 가지므로, 이러한 조건을 고려할 수 있는 수치최적화방법과의 결합을 통해 블레이드의 형상설계 뿐만 아니라 운용조건최적화에서도 향상된 설계과정이 필요하다.<sup>5,6)</sup>

본 연구의 목적은 국내 해상풍황 조건을 적용하여, 최대 연평균발생동력을 갖는 운용조건과 블레이드 형상을 빠른 시간 내에 최적화 할 수 있는 효과적인 설계알고리즘을 구현하는 것이다.

## 2. 해상풍력터빈 블레이드 개념설계

본 연구에서 개발하고자 하는 해상풍력발전시스템의 개요는 Fig. 1과 같다.

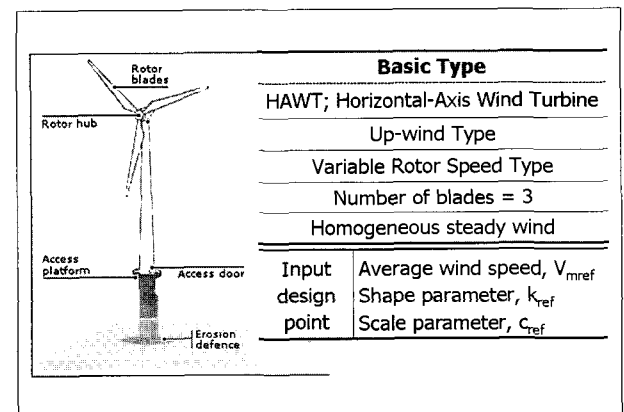


Fig. 1 Concept of offshore wind turbine

### 2.1 Design Objective

본 연구의 목적함수는 풍력터빈에서 발생하는 연간에너지생산을 최대로 하는 것이다. 발생동력(P)과 풍속확률분포함수(f(V))를 이용하여 연평균발생동력,  $\bar{P}(\bar{V})$  을 구할 수 있고, 이는 연간에너지생산량과 비례한다.<sup>7)</sup>

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

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

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

두지만, 해상용에서는 육상보다 이러한 제한이 완화되기 때문에 0.3 이하로 제한하였다.

$$M_{tip} = \sqrt{M^2 + \left(\frac{\pi n D}{a}\right)^2} \leq 0.30 \quad (4)$$

## 2.2 Design Constraints

블레이드의 설계와 성능해석을 위해서 첫 번째로 고려해야 할 제약조건은 solidity( $\sigma$ )로서, 전체 회전 단면적에 대한 실제 블레이드 면적의 비로서 정의된다. 3개의 블레이드 시스템에서  $\sigma$ 는 0.0345 이상의 값을 가진다.<sup>(6)</sup>

$$\sigma_i = \frac{B \int c(r) dr}{\pi R^2} \geq 0.0345 \quad (3)$$

일반적으로 육상용 풍력터빈에서는 소음과 압축성 효과를 고려하여 블레이드 끝 마하수( $M_{tip}$ )를 0.19 이하로 제한을

## 2.3 설계변수와 초기 설계공간의 설정

3차원 풍력터빈 블레이드 설계에서 설계변수의 개수가 증가하면 수렴된 설계결과에 도달하기 위해 요구되는 계산시간과

Table 1 Design variables applied to each design step

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

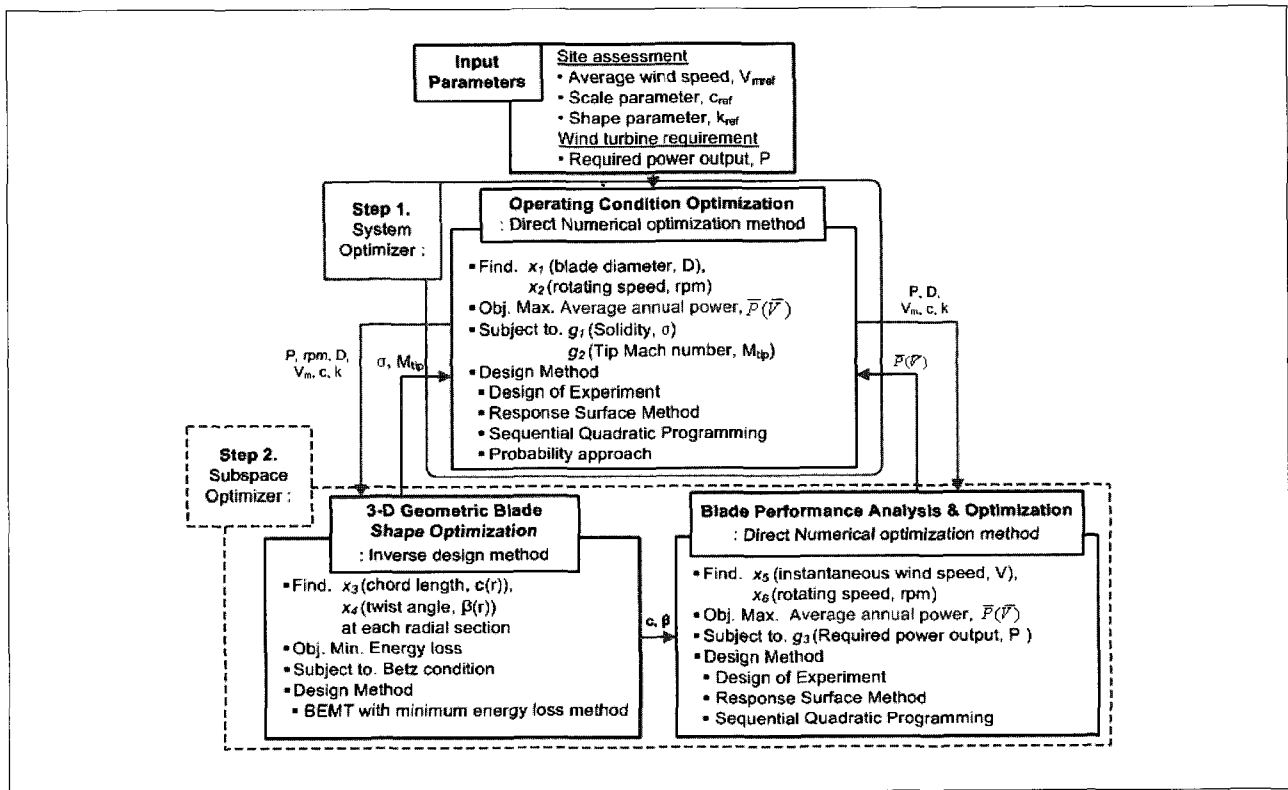


Fig. 2 Two step design optimization process for 3D wind turbine blade

용량이 기하급수적으로 증가한다. 이를 위해서 설계변수를 각 단계별로 세분화하고, 각 단계에 적합한 최적화기법을 적용한다. 설계과정에서 사용된 각 단계별 설계변수를 Table 1에서 나타내었다.

식 (7, 8)으로 설정된 블레이드 지름(D)과 축 회전수(rpm)의 초기설계공간범위는 동력계수( $C_p$ )와 tip speed ratio( $\lambda$ )의 식 (5, 6)에서 유도하였다.

$$0.40 \leq C_p = \frac{2P}{\rho V_{Emax}^3 \pi R^2} \leq 0.45 \quad (5)$$

$$6 \leq \lambda = \frac{R\Omega}{V_{Emax}} \leq 9 \quad (6)$$

$$72.50 \leq D = \sqrt{\frac{8P}{\rho V_{Emax}^3 \pi C_p}} \leq 76.29 \text{ [m]} \quad (7)$$

$$20.91 \leq rpm = \frac{60 V_{Emax} \lambda}{\pi D} \leq 32.83 \quad (8)$$

여기서,  $P=3MW, V_{Emax} = c \left[ \frac{k+2}{k} \right]^{1/k}$  이다.

## 2.4 한반도 연안에서의 풍황 평가

해상풍력터빈 설계를 위한 해상풍황자료는 해상에서 측정장치의 설치와 측정의 어려움 등으로 인해 그 정확성과 신뢰성은 육상에 비해서 많이 낮다고 할 수 있다.

해상풍력터빈 설치를 위한 해상풍황의 통계적 분석<sup>(9)</sup>과 입지 선정 최적화 연구를 수행하여 한반도 연안에서 가장 풍력에너지 밀도가 크고, 30 m 이하의 수심과 해안선에서 5 km 이상의 거리를 가지는 지점을 선정하였다.<sup>(10)</sup> 그 결과로서, 블레이드 설계를 위한 기상풍황입력값으로 이용될 국내해상의 한 지점의 풍황자료를 Table 2에서 나타내었다. Table 2에서 제시된 결과는 2006년도 국립기상연구소 자료<sup>(11)</sup>를 근간으로 와이블 확률분포 중 standard deviation method를 이용한 통계해석모

Table 2 Wind data for wind blade design<sup>(10)</sup>

Longitude	128.6°
Latitude	34.57°
Scale parameter, $c_{ref}$ [m/s]	8.44
Shape parameter, $k_{ref}$	2.19
Average wind speed, $V_{mref}$ [m/s]	7.48

델을 바탕으로 수치최적화된 결과이다. 국립기상연구소 자료는 부이에 의한 실제 측정자료와 20~40%의 오차율을 포함하고 있다. 또한 통계해석모델로서 평균풍속 분포와 가장 비슷한 값을 예측하고 있는 standard deviation method은 기상연구소 자료보다 풍속빈도분포가 다소 높게 예측되었다.

또한 이는 해수면에서 기준높이( $h_{ref}$ ) 10m의 풍황자료로서, 와이블 확률분포에 적용되는  $k$ 와  $c$ 는 블레이드 허브(hub)의 높이( $h$ )에 따라 식 (9, 10)과 같이 수정된다.<sup>(12)</sup>

$$k = k_{ref} \frac{1 - 0.088 \ln(h_{ref}/10)}{1 - 0.088 \ln(h/10)} \quad (9)$$

$$c = c_{ref} \left[ \frac{h}{h_{ref}} \right]^{\frac{0.37 - 0.088 \ln(c_{ref})}{1 - 0.088 \ln(h_{ref}/10)}} \quad (10)$$

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

## 3.1 Step 1: System Optimizer

풍력터빈 블레이드 설계를 위해서 1단계 운용조건 최적화의 설계변수에 3k Full factorial 실험계획법(DOE; Design of Experiments)을 적용하여 실험점을 설정하였다. 또한 설계변수의 변화에 따른 목적함수와 제약함수의 변화를 모델링하여 3차 반응면(RSM; Response Surface Model)<sup>(13)</sup>을 구성하였다.

구성된 설계변수 영역에서 각 제약조건을 충족시키면서  $\bar{P}$  ( $\bar{V}$ )을 최대화하는 최적설계점을 구하기 위해서 국부최적화 이론인 순차이차계획법(SQP; Sequential Quadratic Programming)<sup>(14)</sup>을 적용하였다.

## 3.2 Step 2: Subspace Optimizer

### 3.2.1 3차원 블레이드 형상 최적화

블레이드 형상의 최적설계를 위해서 Adkins 등<sup>(4)</sup>의 최소에너지손실 기법을 결합한 BEMT를 설계에 적용하였다. 각 단면의 블레이드 익형의 유동해석에서 XFOIL<sup>(15)</sup>을 이용하였다. 아음속 정상유동의 익형 주위의 비점성과 경계층을 포함하는 점성영역이 결합된 유동을 해석한다. 블레이드 전체 단면에 적용된 익형은 NREL에서 개발된 S830 익형<sup>(16)</sup>이다.

### 3.2.2 블레이드 성능 해석과 최적화

형상 최적화 단계에서 설계된 블레이드는 운용범위 내에서 성능해석을 한다. 이 때 최대  $\bar{P}(\bar{V})$  을 구하기 위해 다음과 같이 문제를 정의한다.<sup>(7)</sup>

$$\text{Maximize } \bar{P}(\bar{V}) = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} P(V) f(V) dV \quad (11)$$

Subject to (12)

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

### 3.3 설계공간의 타당성 향상

흔히 처음 설계를 시작할 때에는 설계자의 직관이나 경험식에 의해서 초기설계공간을 설정한다. 그러나 이러한 초기설계공간 내에서는 모든 제약조건을 만족하는 타당성 있는 영역<sup>(7)</sup>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.<sup>(8)</sup> 또한 주어진 설계공간보다 성공확률이 높은 영역으로의 이동을 위해 성공확률분포에서 설계변수의 평균값( $\omega$ )의  $3\sigma$  범위로 설계공간을 수정하는 Chebyshev inequality 조건을 이용하였다.  $3\sigma$ 의 설

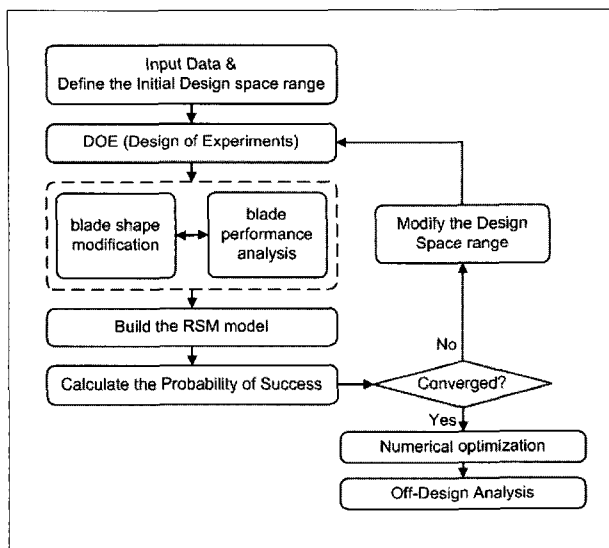


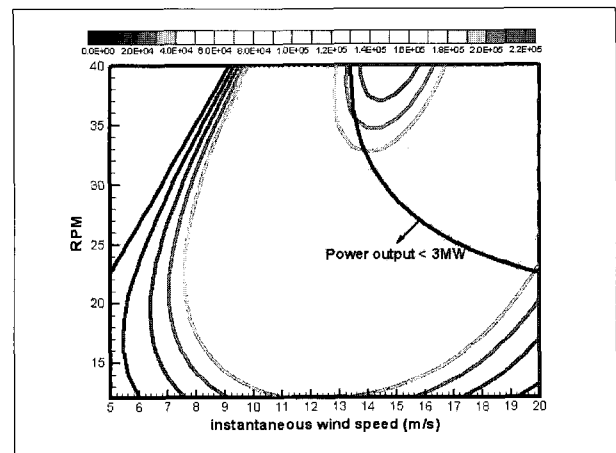
Fig. 3 Flowchart for wind turbine blade design

계범위는 적어도 89% 이상의 성공확률범위를 포함한다. 이 과정은 설계공간 내에 전역최적점(global optimum)이 나타날 때까지 반복한다. 이러한 풍력터빈 블레이드의 전체설계과정을 Fig. 3에서 나타내었다.

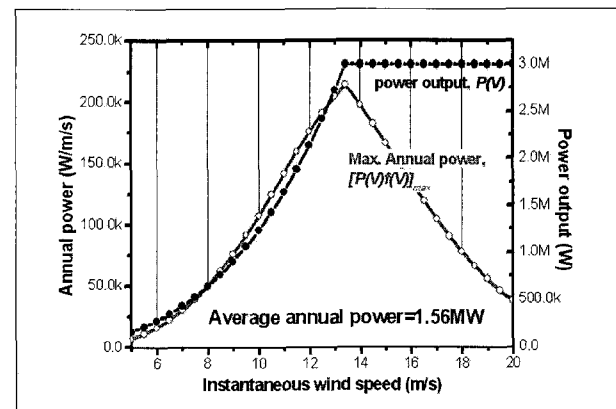
## 4. 결과 및 토의

### 4.1 블레이드 성능해석과 최적화

1단계 운용조건 최적화 단계에서 추출된 각 실험점은 2단계 형상설계단계와 설계된 형상의 성능해석 과정의 입력조건이 된다.



(a) Annual power( $P(V)f(V)$ ) contour with Power( $P(V)$ ) constraint



(b) Power output( $P(V)$ ) and maximum annual power ( $[P(V)f(V)]_{\max}$ ) curve

Fig. 4 Power output and Annual power curve, Case of  $D=72.50$  m and  $\text{rpm}=32.83$

Figure 4에서  $D=72.5$  m,  $\text{rpm}=32.83$ 의 실험점의 입력조건에서 설계된 블레이드 형상에 대한 성능 분포 예시를 나타내었다. 순간풍속의 증가에 따라 최대  $P(V)f(V)$ 은 점차적으로 증가하지만,  $P(V)=3$  MW를 만족하는  $V_r$ 에 도달하면 3 MW 발생동력의 제약조건을 만족시키며 감소한다.

### 4.2 설계공간 타당성 향상을 통한 최적화

Figure 5는 초기설계공간과 최종설계공간에서 1단계의 목적함수와 제약조건들을 나타내었다. 초기설계공간에서 제약조건들을 만족하는 설계변수의 국부최적점은  $D=76.28$  m,  $\text{rpm}=24.26$ 이고,  $\bar{P}(\bar{V})_{\max}$ 값은 1.603 MW이다. 그러나 이

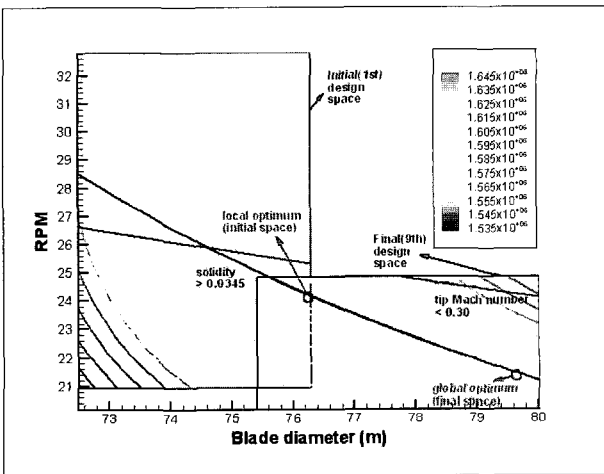


Fig. 5 Objective function (average annual power) and constraints (solidity and tip Mach number) contours in design space

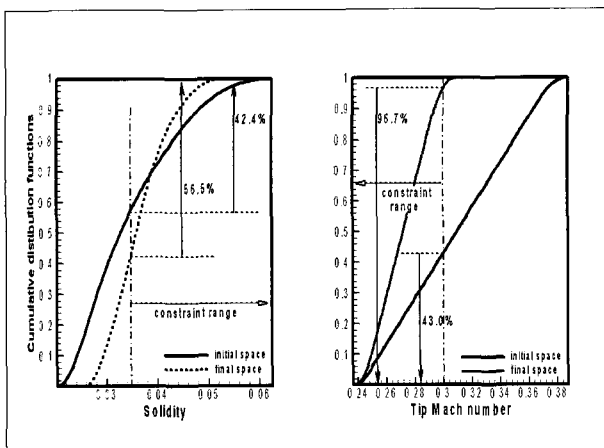


Fig. 7 Joint CDF of the design constraints

최적점의 위치는 초기설계공간  $D$ 의 가장자리에 위치하고 있으므로, 확률적 접근방법을 이용한 설계공간의 변화에 따라 향상된 최대목적함수의 값을 가진 전역최적점을 찾을 수 있다.

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

Figure 6에서 확률적 접근방법에 의한 설계공간의 변화를 나타내었다. 초기설계공간 내에서 각 제약조건을 만족시키는 타당성 있는 영역은 좁은 영역에 국한되어 있다. 1단계 설계변수인  $D$ 와  $\text{rpm}$ 의 확률분포에 대한 평균값( $\mu$ )은 각각 76.16 m, 24.17이다. 이 평균값을 기준으로 양쪽으로 표준편차( $\sigma$ )의 3배 범위로 설계공간을 이동시킨다. 9번의 최종설계공간까지 이동 후, 성공확률의 분포는 초기설계공간에서보다 표준정규분포에 가까워짐을 알 수 있다.

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

### 4.3 블레이드 최적형상 비교

3 MW의 요구동력 설계조건에서 모든 제약조건을 만족하고 목적함수를 최대로 하여 설계된 풍력터빈 블레이드 형상의 각

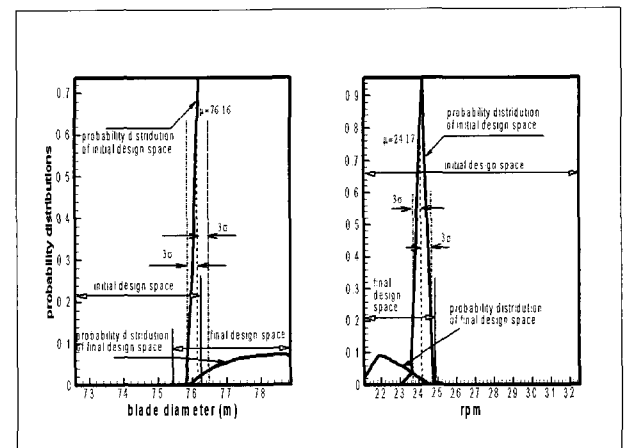


Fig. 6 Probability distribution of the design variables in the operating condition

Table 3 Design parameter results for optimum blade configurations

설계 매개변수		Designed Blade	
		초기설계공간	최종설계공간
설계조건	P	3 MW	
설계변수	D	76.29 m	79.72 m
	rpm	24.26	21.35
목적함수	$\bar{P}$ ( $\bar{V}$ )	1.603 MW	1.612 MW
제약조건	$\sigma$	0.0345	0.0345
	$M_{tip}$	0.288	0.265

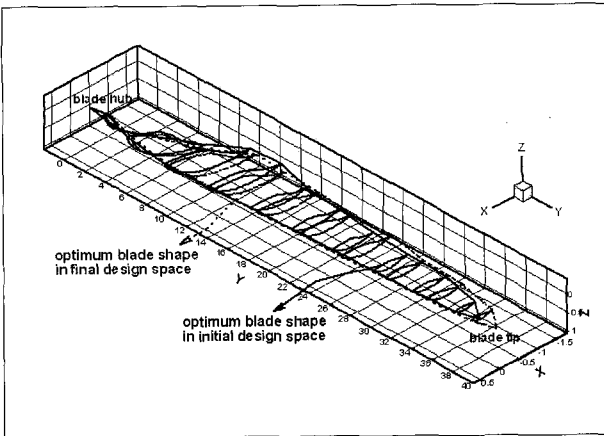


Fig. 8. Comparison of the optimized 3D wind turbine blade configuration

설계 매개변수들을 Table 3에서 정리하였다. 전체 설계공간에서 제약조건은  $M_{tip}$ 보다  $\sigma$ 의 영향을 많이 받고 있다. 그러나 현재의 설계결과는 제약조건의 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.

본 연구에서 도출된 결과는 현재 상용중인 여러 블레이드의 D보다 짧은 값을 가진다. 이는 구성된 통계해석모델이 국내 풍황자료(field data)보다 다소 높은 k, c를 예측하기 때문이다.

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

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 연안의 해상풍력 자원을 고려하여 설계 범위 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 전역최적점을 찾기 위해서 설계공간의 이동을 통해 초기공간의 0.17% 성공확률에서 최종설계공간의 16.14%로 증가시켰다. 최종설계공간에서 도출된 최적점은 블레이드 지름 79.72 m, 축회전수(rpm) 21.35이고, 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.

## 후기

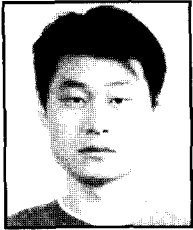
본 연구는 서울대학교 BK21 차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단과 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 깊이 감사드립니다.

## References

- (1) Dornberger R, Stoll P, Buche 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. Gottingen Reports, pp. 193-213
- (4) Adkins CN, and Liebeck RH, 1984, Design of Optimum Propellers, Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 5, pp. 676-682
- (5) Lee, K. H., Joo, W. D., Kim, K. H., Lee, D. H., Lee, K. T. and Park, J. P., 2007, Numerical Optimization using Improvement of the Design Space Feasibility for Korean Offshore Horizontal Axis Wind Turbine Blade, Europe's premier wind energy event, ewec2007
- (6) 이기학, 홍상원, 정지훈, 김규홍, 이동호, 이경태, 2007, 효율적인 2단계 최적화를 통한 3차원 풍력터빈 블레이드 설계, 2007년 한국신재생에너지학회 춘계학술발표회, pp. 432-436
- (7) 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
- (8) Tony B, David S, Nick J, Ervin B, 2001, Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons
- (9) Sathyajith Mathew, 2006, Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer
- (10) 이기학, 전상욱, 구요천, 박경현, 이동호, 2007, 기상풍황자료 통계적 분석을 통한 한국형 해상풍력터빈 설치지점 선정 최적화 연구, 2007년 한국신재생에너지학회 춘계학술발표회, pp. 404-408
- (11) Wind Waves 2006 DB, 국립기상연구소
- (12) Frost W, Long B. H. and Turner R. E., 1978, Engineering Handbook on the Atmospheric Environmental Guidelines for Use in Wind Turbine Generator Development, NASA Technical Paper 1359
- (13) Myers RH and Montgomery DC, 1995, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments; New York, John Wiley & Sons,
- (14) Vanderplaats GN, 1984, Numerical Optimization, Techniques for Engineering Design: With Applications; 3rd ed. New York: McGraw-Hill
- (15) 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
- (16) Somers DM, The S830, S831, and S832 Airfoils. NREL/SR-500-36339, August 2005
- (17) Arora J S, 1989, Introduction to Optimum Design. McGraw-Hill
- (18) Mavris DN, Bandte O and DeLaurentis DA. Determination of System Feasibility and Viability Employing a joint Probabilistic Formulation. AIAA Paper 99-0183, January 1999



### 이기학



2000년 울산대학교 항공우주공학과 공학사  
2002년 세종대학교 기계항공우주공학부 공학석사

현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정 연구원  
(E-mail : ricky65@snu.ac.kr)

### 김규홍



1995년 서울대학교 항공우주공학과 공학사  
1997년 서울대학교 항공우주공학과 공학석사  
2001년 서울대학교 항공우주공학과 공학박사

현재 서울대학교 기계항공공학부 조교수  
(E-mail : aerocfd1@snu.ac.kr)

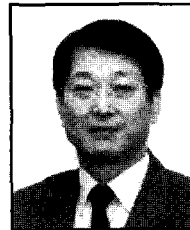
### 홍상원



2003년 서울대학교 기계항공공학부 공학사  
2006년 서울대학교 기계항공공학부 공학석사

현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정 연구원  
(E-mail : consul7@snu.ac.kr)

### 이동호



1972년 서울대학교 기계공학과 공학사  
1975년 한국과학기술원 기계공학과 공학석사  
1979년 Univ. of Poitiers 항공기계공학 공학박사

현재 서울대학교 기계항공공학부 교수  
(E-mail : donghlee@snu.ac.kr)

### 정지훈



2004년 서울대학교 기계항공공학부 공학사

현재 서울대학교 기계항공공학부 석박사통합과정 연구원  
(E-mail : ssn557@snu.ac.kr)

### 이경태



1980년 서울대학교 항공우주공학과 공학사  
1982년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학석사  
1990년 Stanford Univ. 항공우주공학과 공학박사

현재 세종대학교 기계항공우주공학부 교수  
(E-mail : kntlee@sejong.ac.kr)