

5MW급 수평축 풍력발전 블레이드의 다점 최적설계

*박 경현¹⁾, 전 상욱²⁾, 김 상훈³⁾, 정 지훈⁴⁾, 이 기학⁵⁾, 전 용희⁶⁾, 최 동훈⁷⁾, **이 동호⁸⁾

Multi-Point Design Optimization of 5MW HAWT Blade

*Kyung-Hyun Park, Sang-Ook Jun, Sang-Hun Kim, Ji-Hun Jung, Ki-Hak Lee, Yong-Hee Jeon, Dong-Hoon Choi, and **Dong-Ho Lee

Abstract : 본 연구에서는 5MW급 수평축 풍력발전 블레이드에 대한 정격풍속과 낮은 풍속 영역을 고려하여 풍속에 대한 다점 최적설계를 수행하였다. 다점 최적설계를 수행하기 위해 블레이드 해석은 Blade Element and Momentum theory를 이용 하였으며, 설계 시 적용된 기저형상은 NREL에서 제안한 5MW급 풍력터빈 블레이드이다. 최적화 과정을 통해 얻어진 최적해의 집합에 대하여 L₂ Norm을 통한 파레토 분석을 하였으며, 이를 통해 기저형상의 연간 에너지생산량과 설비 이용률을 보다 향상 시킬 수 있었다.

Key words : Multi-Point Design Optimization(다점 최적설계), AEP(Annual Energy Production), CF(Capacity Factor), BEM(Blade Element and Momentum theory), Chord Distribution(코드길이 분포), Twist Distribution(비틀림 분포)

Nomenclature

x : design variable vector
 x^U : upper bound of design variable
 x^L : lower bound of design variable
 $f(x)$: objective function
 $h_i(x)$: equality constraints
 $g_j(x)$: inequality constraints
 W_i : weighting factors
 C_p : power coefficient
 C_T : total thrust coefficient
 $P(v)$: power output, KW
 $f(v)$: Weibull probability distribution

로 로터 블레이드의 설계 시 설치지역의 바람 특성을 고려하여 연간발전량(AEP : Annual Energy Production) 및 설비 이용률(CF : Capacity Factor)을 최대화 하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 풍속의 낮은 영역에서의 설계점을 포함한 공력기반 다점 최적설계를 수행하여 5MW급 블레이드의 섹션별 시위길이 및 비틀림 분포를 얻었다. 그리고 최적화된 블레이

1. 서론

전 세계적으로 신재생에너지에 대한 기대와 수요가 증가함에 따라 전력시장에서 풍력발전이 차지하는 비중 또한 크게 증가하고 있다. 그리고 이러한 추세에 발 맞춰 국내에서도 풍력발전의 설비 용량을 늘리기 위해 5MW급 이상의 대형화와 대규모 풍력단지 조성 등의 계획이 수립되고 연구가 진행 중에 있다.

바람의 운동에너지를 이용하여 필요한 동력을 얻는 풍력시스템의 로터 블레이드는 풍력발전 시스템의 효율을 결정짓는 중요한 부분이다. 그러나 일반적으로 풍력발전기의 설치 지점에서 풍속에 대한 확률은 정격출력을 낼 수 있는 풍속에 비해 낮은 풍속 영역에 많이 분포하게 된다. 그러므

-
- 1) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : pkh365@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 2) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : ellga5@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 3) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : pusher2@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 4) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : ssn557@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 5) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : ricky65@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 6) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : yhjeon1@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 7) 한양대학교 기계공학부
E-mail : dhchoi@hanyang.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
 - 8) 서울대학교 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소
E-mail : donghlee@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662

드의 출력곡선에 대하여 제주 고산지역의 풍속 확률분포를 이용한 연간에너지생산량(AEP)과 설비이용률(CF)을 구하였으며, 그 결과 기저형상에 비해 향상된 것을 확인할 수 있었다. 최적화 수행 시 사용된 로터 블레이드의 Baseline은 NREL 5MW 로터 블레이드⁽¹⁾이며, 공력해석 기법으로는 BEM기법을 이용하였다.

2. 해석 및 설계기법

다점 최적설계 흐름도는 Fig. 1과 같다.

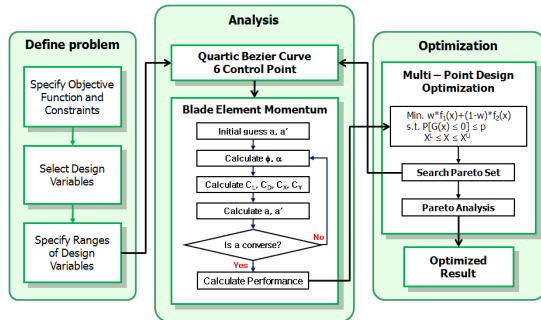


Fig. 1 Multi - Point Design Optimization Procedure

2.1 Blade Element Momentum 기법

본 연구에서는 블레이드의 성능을 해석하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 방법 중 하나인 BEM기법을 이용하였다. 또한 BEM기법을 이용한 해석 시 Prandtl's Tip and Hub Loss Factor와 Modified Glauert Correction(Buhl, 2004)을 적용하여 축과 회전 방향의 흐름유도계수(induction factor)를 계산하였다. 해석 기법에 대한 자세한 사항은 참고문헌 (3)을 참고하도록 한다.

해석에 사용된 코드는 NREL에서 개발한 5MW급 풍력터빈 블레이드⁽¹⁻²⁾의 성능과 비교 및 검증하였다. 해석 코드는 Fig. 2-1,2,3에서 볼 수 있듯이 주어진 블레이드에 대한 성능을 잘 표현하는 것을 확인하였다.

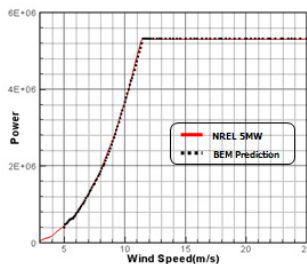


Fig. 2-1 BEM Prediction of Power

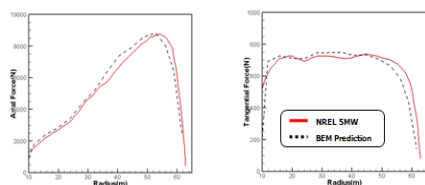


Fig. 2-2 Axial and Tangential Force Distribution at 9 m/s

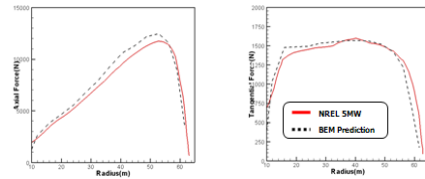


Fig. 2-3 Axial and Tangential Force Distribution at 11.4 m/s

2.2 다점 최적설계

일반적인 직접 설계방법에서 주로 사용되는 최적화 기법은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } x \\
 & \text{min. } f(x) \\
 & \text{s.t. } h_i(x) = 0 \quad ; \quad i = 1, \dots, k \\
 & \quad g_j(x) \leq 0 \quad ; \quad j = 1, \dots, l \\
 & \quad x^L \leq x \leq x^U
 \end{aligned} \quad (1)$$

이를 여러 설계 점에서의 성능을 향상시키기 위해 각 설계 점에서 가중 계수와 목적함수 곱의 합으로 나타내면 목적함수는 식 (2)와 같은 다목적 함수가 된다.

$$\text{min. } F(x) = \sum_{i=1}^{i=n} W_i f_i(x) \quad (2)$$

그리고 다목적 함수를 이용해 얻어진 최적해들의 집합으로부터 파레토(Pareto) 분석을 통해 최적해를 찾게 된다. 파레토 분석은 Fig. 3과 같이 유토피아 포인트(Utopia Point)에서 각각의 최적해까지의 L₂ Norm이 가장 작은 것을 최적해로 선택하였다.⁽⁴⁾

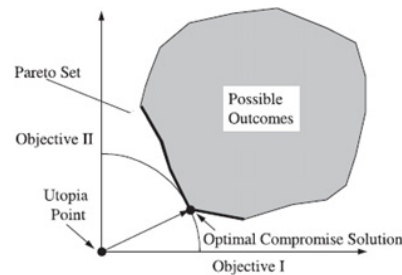


Fig. 3 Pareto Analysis of Multi-Objective Optimization

다점 최적설계의 결과로서 얻어진 블레이드 형상에 대한 평가는 풍력에너지밀도가 우수한 제주 서해안의 고산 지역 2008년 시간별 풍속 데이터(기상청)를 이용하여 식 (3)의 연간 에너지 생산량과 식 (4)의 설비이용률을 구하였다.⁽⁵⁻⁷⁾

$$AEP = \sum (P(v) \cdot f(v) \cdot 8,760) \quad (3)$$

$$CF = \frac{AEP(kWh)}{\text{Rated Power}(kW) \cdot 8,760} \cdot 100\% \quad (4)$$

이 때 풍속의 확률분포는 등급계수(c)와 형상계수(k)로서 특정 지어지는 와이블(Weibull) 확률분포를 이용하였다.⁽⁸⁾

3. 최적설계 및 결과

3.1 최적설계 문제의 정식 및 최적설계

본 연구에서 수행한 5MW급 풍력터빈 블레이드의 다점 설계는 NREL에서 제안한 5MW급 풍력터빈 블레이드를 기저 형상으로 사용하였으며, 동일한 운용조건을 이용 하였다. 기저형상과 운용조건은 Table 1,2와 같다.

Table 1 Baseline of 5MW Wind Turbine Blade

r_node(m)	Chord(m)	Twist(deg)	Airfoil
2.8667	3.5420	13.3080	Cylinder1
5.6000	3.8540	13.3080	Cylinder1
8.3333	4.1670	13.3080	Cylinder2
11.7500	4.5570	13.3080	DU40_A17
15.8500	4.6520	11.4080	DU35_A17
19.9500	4.4580	10.1620	DU35_A17
24.0500	4.2490	9.0110	DU30_A17
28.1500	4.0070	7.7950	DU25_A17
31.2500	3.7480	6.5440	DU25_A17
36.3500	3.5020	5.3610	DU21_A17
40.4500	3.2560	4.1880	DU21_A17
44.5500	3.0100	3.1250	NACA64_A17
48.6500	2.7640	2.3190	NACA64_A17
52.7500	2.5180	1.5260	NACA64_A17
56.1667	2.3130	0.8630	NACA64_A17
58.9000	2.0860	0.3700	NACA64_A17
61.6333	1.4190	0.1060	NACA64_A17

Table 2 Operating Condition of 5MW Wind Turbine Blade

Rated Power (MW)	5
Diameter of Rotor & Hub (m)	126 / 3
Hub Height (m)	90
Cut in : Rated : Cut out Speed (m/s)	3 / 11.4 / 25
Cut-in : Rated RPM	6.9 / 12.1
Rated Tip Speed (m/s)	80

설계점은 정격풍속 11.4 m/s와 정격풍속 이전의 7.2 m/s를 선택하였으며, 다점 최적화 문제는 위의 식 (4)와 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max. } W \cdot \text{Power}_{7.2\text{m/s}} + (1 - W) \cdot \text{Power}_{11.4\text{m/s}} \quad (4) \\
 & \text{s.t. } C_p \leq 0.593 \\
 & C_T \leq C_{T, \text{Baseline}} \\
 & \text{Solidity} \geq 0.0345 \\
 & 0\text{m} \leq X_{\text{Chord}} \leq 5\text{m} \\
 & 0^\circ \leq X_{\text{Twist}} \leq 15^\circ
 \end{aligned}$$

또한 본 연구는 공력기반 최적설계이므로 구조역학이나 동역학에 대한 고려가 되지 않았으며, 그 대신 로터블레이드의 굽힘 및 피로하중에 영향을 미치는 추력계수를 기저형상보다 작게 하는 제약조건을 이용하였다.

최적화 수행 시 다목적 함수에 대한 최적해들의 집합을 찾기 위해 가중계수는 0에서 1까지 0.01단위로 100번의 최적화를 SQP(Sequential Quadratic Programming)를 이용 하여 수행 하였으며, 효율적인 설계를 위하여 시위길이 분포와 비틀림 분포에 대하여 4차 베지어 커브(Bezier Curve)의 조종점(Control Point)들을 이용하여 설계변수를 조종 하였다.

3.2 결과 및 분석

다점 최적설계를 수행 후 파레토 최적해의 집합을 찾을 수 있었으며, 유토피아 포인트에서 각 최적해 까지의 L₂ Norm을 계산하여 가중계수가 0.46인 최적해를 최종적으로 선택하였다. 선택된 해의 형상과 기저형상의 시위길이 분포와 비틀림 분포는 Fig. 4,5와 같다.

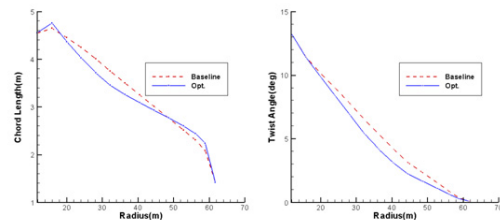


Fig. 4 Optimized Chord and Twist Angle Distribution

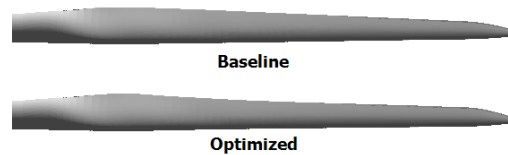


Fig. 5 Shapes of Baseline and Optimized Blade

최적화된 시위길이의 경우 기저형상에 비해 루트부분을 지나 약 2%증가 하다가 감소하며, 길이방향 30m 지점에서는 약 7%로 가장 많이 감소했다. 그리고 팁으로 가면서 양력을 증가시키기 위해 다시 시위길이 길어지는 것을 볼 수 있다. 이는 NACA64_A17의 에어포일이 상대적으로 공력성능이 우수하기 때문에 팁에서 시위길이 길어져 전체적으로 양력을 증가시킨 것으로 볼 수 있다.

비틀림 분포의 경우 기저형상에 비해 전체적으로 줄어든 경향을 볼 수 있으며 길이방향 48m 지점에서 28%로 가장 많이 감소하였다. 최적화된 형상에 대한 Cut-in속도에서 정격속도까지의 출력곡선은 Fig. 6과 같다.

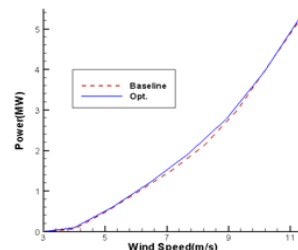


Fig. 6 Power Performance of Optimized Blade

출력곡선에서 볼 수 있듯이 다점 최적설계를 통해 정격출력과 낮은 속도영역에서 모두 출력이 증가한 것을 확인 할 수 있다. 그리고 특히 정격출력이 발생하는 속도에서 보다 낮은 속도영역에서 출력이 더 증가한 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 7,8에서 보는 바와 같이 7.2 m/s 일 때 정격출력인 11.4 m/s과는 달리 길이방향 40m를 지나면서 공력성능이 상대적으로 우수한 NACA64_A17의 에어포일의 유효받음각이 증가하게 되므로 급격하게 Tangential Force가 커지게 되고 출력이 상대적으로 높게 나오는 것으로 볼 수 있다.

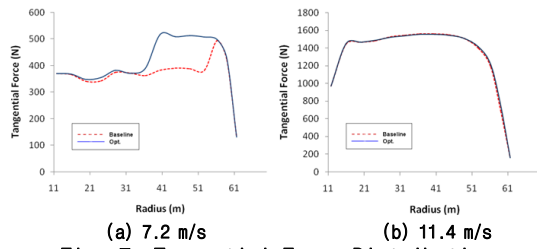


Fig. 7 Tangential Force Distribution

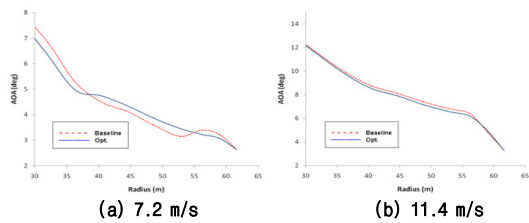


Fig. 8 Effective Angle Of Attack Distribution over the 30m

따라서 증가된 출력곡선을 통해 Cut-in속도에서 Cut-out속도까지 제주 고산지역의 풍속에 대한 확률분포를 곱하여 Table 3과 같이 기저형상과 최적화된 형상에 대한 연간 에너지 생산량 및 설비 이용률 구한 결과 최적형상이 기저형상의 연간 에너지 생산량과 설비 이용률에 대하여 각각 약 2%와 1.2%의 향상률을 보였다.

Table 3 Improvement of AEP and CF

	AEP	CF
Baseline	15.83 GWh	33.94 %
Opt.	16.14 GWh	34.36 %
Improvement	1.98 %	1.24 %

4. 결론

본 연구에서는 BEM기법을 이용하여 풍력터빈 로터 블레이드에 대한 성능을 해석하였다. 그리고 NREL 5MW 로터 블레이드를 기저형상으로 하여 다점 최적설계를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 낮은 속도영역을 고려한 다점 최적설계를 통해 전영역에서 기저형상보다 출력이 증가된 형상을 얻을 수 있었다.
2. 최적화된 형상은 기저형상에 비해 낮은 속도영역에서는 공력성능이 우수한 블레이드 끝단

에어포일의 유효 받음각이 증가하게 되어 출력이 증가 하는 것을 확인 하였다.

3. 제주 고산지역의 풍속에 대한 확률분포를 이용하여 증가된 출력에 대한 연간 에너지 생산량과 설비 이용률을 확인한 결과 기저형상에 비해 각각 약 2%와 1.2%를 향상 시킬 수 있었다.

향후 구조역학 및 동역학을 고려한 최적설계를 수행 할 계획이며, 이러한 다분야를 고려한 통합설계 수행 시 더 실현 가능한 풍력발전 로터 블레이드의 설계가 가능 할 것으로 본다.

후 기

본 연구는 서울대학교 BK21 차세대 기계항공시스템 창의 설계 인력양성사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 과제를 지원해 주신 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

References

- [1] Jonkman J., 15 February 2007, NREL OffshorBaseline 5MW. NWTN/NREL TP-500-38060, Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory / Cole Boulevard: National Wind Technology Center.
- [2] W. Xudong, W.Z. Shen, W.J. Zhu, J.N. Sorensen, 2009, "Shape Optimization of Wind Turbine Blades," Wind Energy 2009, DOI:10.1002/we.335.
- [3] Moriarty PH, Hansen AC, January 2005, "AerDyn theory manual," Technical report NREL/TP-500- 36881.
- [4] E.M. Kasprzak, K.E. Lewis, 2006, "Pareto analysis in multiobjective optimization using the collinearity theorem and scaling method," Struct Multidisc Optim, Vol. 22, pp. 208~218.
- [5] K.H. Lee, S.O. Jun, K.H. Park, D.H. Lee, K.W. Lee, J.P. Park, 2009, "Numerical Optimization of Site Selection for Offshore Wind Turbine Installation Using Genetic Algorithm," CURRENT APPLIED PHYSICS, Accepted.
- [6] 이기학, 홍상원, 정지훈, 김규홍, 이동호, 이경태, 2007, "효율적인 2단계 최적화를 통한 3차원 해상풍력터빈 블레이드 설계, 2007 한국신재생에너지학회 춘계학술대회 논문집, pp.432~436.
- [7] 황병선 공저, 2009, "최신 풍력터빈의 이해," 도서출판 아진.
- [8] Sathyajith Mathew, 2006, "Wind Energy," Springer.