

## 소형풍력발전기용 블레이드 공력설계 프로그램 개발

윤진용\*, 백인수\*\*, 유능수\*\*\*

\*강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과(yjyung@kangwon.ac.kr),  
\*\*강원대학교 기계메카트로닉스공학과(paek@kangwon.ac.kr),  
\*\*\*강원대학교 기계메카트로닉스공학과(yoonesoosoo@kangwon.ac.kr)

### Development of an aerodynamic design program for a small wind turbine blade

Yoon, Jin-yong\* Paek, In-su\*\* Yoo, Neung-soo\*\*\*

\*Dept. of Mechanical and Mechatronics Eng., Graduate School, Kangwon National University  
(yjyung@kangwon.ac.kr),

\*\*Dept. of Mechanical and Mechatronics Eng., Kangwon National University(paek@kangwon.ac.kr),

\*\*\*Dept. of Mechanical and Mechatronics Eng., Kangwon National University(yoonesoosoo@kangwon.ac.kr)

#### Abstract

An aerodynamic design tool was developed for small wind turbine blades based on the blade element momentum theory. The lift and drag coefficients of blades that are needed for aerodynamic blade design were obtained in real time from the Xfoil program developed at University of Illinois. While running, the developed tool automatically accesses the Xfoil program, runs it with proper aerodynamic and airfoil properties, and finally obtains lift and drag coefficients. The obtained aerodynamic coefficients are then used to find out optimal twist angles and chord lengths of the airfoils. The developed tool was used to design a wind turbine blade using low Reynolds number airfoils, SG6040 and SG6043 to have its maximum power coefficient at a specified tip speed ratio. The performance of the blade was verified by a commercial code well known for its prediction accuracies.

Keywords : 블레이드(Blade), 공력설계(Aerodynamic Design), 최적화(Optimization), 소형풍력발전기(Small Wind Turbine), GUI (Graphic User Interface)

#### 기 호 설 명

$a$  : 축 흐름 유도계수

$a'$  : 회전 흐름 유도계수 (접선방향)

$C$  : 코드 길이

$D$  : 로터 직경

$\theta$  : 피치각

$\phi$  : 유동각

submit date : 2012. 10. 10, judgment date : 2012. 10. 18, publication decide date : 2013. 2. 22  
communication author : Paek, Insu(paek@kangwon.ac.kr)

$N$	: 블레이드 수
$R$	: 로터 반지름
$\lambda$	: 선단속도비 (TSR)
$Re$	: 레이놀즈 수
$M$	: 마하수
$C_n$	: 수직하중계수
$C_t$	: 접선하중계수
$F$	: Prandtl의 블레이드 끝 손실계수
$C_p$	: 출력계수

## 1. 서 론

현재 전 세계적으로 친환경 신재생 에너지가 주목받고 있다. 그 중에서 풍력은 다른 신·재생 에너지원과 비교하여 상대적으로 낮은 발전단가와 성숙한 기술 덕분에 매년 큰 성장을 보이고 있으며, 전 세계적으로 많은 풍력발전단지가 건설되고 있다. 상업용 발전의 경제성을 높이기 위한 노력으로 풍력발전기는 점차 대형화되고 있으며, 현재 로터 지름이 160m 이상인 7.5MW급 풍력발전기가 상용화를 준비 중이다.

대규모의 발전단지를 구성하는 MW급 대형 풍력발전기와 달리 100kW 이하의 소형 풍력발전기에 관한 연구도 활발히 진행 중이다.

풍력발전기는 용량과 관계없이 동일한 원리를 이용하여 발전하게 된다. 즉 불어오는 바람은 블레이드를 회전시키고 블레이드는 허브와 결합한 구동축을 회전시켜 최종적으로 발전기에서 전기를 생산하게 된다. 이 중 바람 에너지를 운동에너지로 바꾸어주는 블레이드는 공기역학적 이론을 적용하여 에너지 변환 효율이 최대가 되도록 설계되며, 이는 풍력발전기 전체 효율에 직접적인 영향을 미치게 된다.

풍력발전기 블레이드의 효율은 특정 양력계수와 항력계수를 갖는 익형의 조합으로 결정되며, 일반적으로 양력계수와 항력계수의 비인 양항비와 양력계수가 높은 익형이 높은 에너지 변환 효율을 보이게 된다. 익형의 양력계수와 항력계수는 익형의 받음각(Angle of Attack), 레이놀즈수(Reynolds Number), 마

하수(Mach Number)에 의한 함수이지만, 풍력발전기의 블레이드를 통과하는 공기의 유동은 마하수가 비교적 낮아 받음각과 레이놀즈수에 대한 함수로 결정된다. 다양한 익형들의 양력계수와 항력계수의 값은 대부분 풍동실험을 이용하여 얻어지게 되며, 여러 문헌상에 제시되어 있다 [1, 2].

현재까지의 1kW 이하의 마이크로 소형 풍력발전기 블레이드 설계에 관한 논문을 살펴보면 [3, 4, 5], 대상 익형에 대해 문헌상의 높은 레이놀즈수에서의 양력계수와 항력계수의 값의 실험값을 이용하여, 최대 에너지 변환 효율을 얻기 위한 블레이드의 각 익형의 시위길이(Chord Length)와 비틀림 각(Twist Angle)을 결정하게 된다. 이 과정에서 시위 길이의 변화는, 레이놀즈수의 변화를 초래하게 되며, 결과적으로 그 익형의 양력계수와 항력계수의 변화를 가져오게 된다. 따라서 블레이드 설계를 위해서는 시위선의 길이 변화에 따른 양력계수와 항력계수의 재계산 및 반복법(Iteration)에 의한 수치적 해법을 필요로 하게 된다.

하지만 문헌상에서 얻을 수 있는 양력계수와 항력계수는 일반적으로 대형 풍력발전기 블레이드의 레이놀즈수에 해당하는  $4.0 \sim 5.0 \times 10^6$  범위에 대한 값이기 때문에 레이놀즈수  $5.0 \sim 6.0 \times 10^4$  [5]의 범위를 갖는 소형 풍력발전기 블레이드를 설계하는데 부적합한 문제점을 갖고 있다. 따라서 본 논문에는 실속이전에서 매우 신뢰성 있는 양력계수와 항력계수를 얻을 수 있는 프로그램으로 알려진 Xfoil[6]을 이용하여 Matlab GUI 환경에서 소형 풍력발전기 블레이드 설계를 위한 프로그램을 개발하였다.

## 2. 프로그램 소개

### 2.1 Xfoil

Xfoil은 1980년 MIT Daedalus Project를 위한 디자인 프로그램으로서 MIT Mark Drela에 의해 처음 개발됐다. 이 프로그램은 여전히

널리 사용 되어 지고 있으며, 2008년 4월에, 버전 6.97이 공개되었다. Xfoil은 아음속 익형의 디자인과 분석을 위한 양방향(interactive) 프로그램이며, 레이놀즈수 그리고 2D의 익형의 좌표를 입력하면 익형 표면에서의 압력분포와 양력계수, 항력계수를 계산할 수 있다. Xfoil은 2차원 익형에 패널법(panel method)을 적용하여 해석하기 때문에 신속하게 해석할 수 있고, 실속이전까지 데이터는 실험자료와 상당한 일치율을 보이는 것으로 알려져 있어, 많은 연구소와 기업에서 아직도 많이 사용하고 있다. 따라서 이를 본 연구에서의 소형 풍력발전기 블레이드의 공력설계를 위한 프로그램으로 이용하였다[6].

### 2.2 공력설계 프로그램 기본원리

맷랩 GUI(Graph User Interface)를 이용하여, 원하는 선단속도비와 각속도에서, 소형 풍력발전기 블레이드의 출력계수를 최대화하기 위한 익형의 시위길이와 비틀림 각을 계산하는 공력설계 프로그램을 개발하였다.

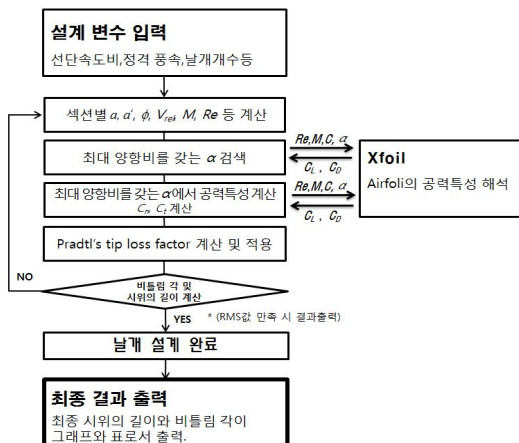


Fig. 1 Flowchart of developed blade design program.

그림 1에 제시된 순서도에서 알 수 있듯이 공력설계 프로그램은 선단속도비와 정격풍속 등을 설계변수 값으로 입력받은 후, Xfoil과 연동하여 레이놀즈수, 그리고 익형의 형상, 비

틀림 각, 시위의 길이에 대한 초기 값을 Xfoil에 넘겨주게 된다. 그러면, Xfoil은 이러한 조건을 만족시키는 양력계수와 항력계수 등의 익형 성능을 계산하고, 그 결과를 다시 공력설계 프로그램으로 넘겨주게 된다. 공력설계 프로그램에서는 Xfoil에서 받은 양력계수와 항력계수를 이용하여, 출력계수를 최대로 하기위한 비틀림 각과 시위의 길이를 계산하게 된다. 또한, 이를 이용하여, 다시 레이놀즈수, 비틀림 각, 시위의 길이에 대한 값을 수정한 후 위의 과정을 반복계산하게 되며, 비틀림 각과 시위의 길이 값이 수렴될 때까지 반복 수행한다.

### 2.3 공력설계 프로그램 구성

그림 2는 공력설계 프로그램을 처음 실행시켰을 때의 시작 화면을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 시작화면은 Main, Blade, Graph, Result, About 등에 대한 탭으로 구성되어 있다.

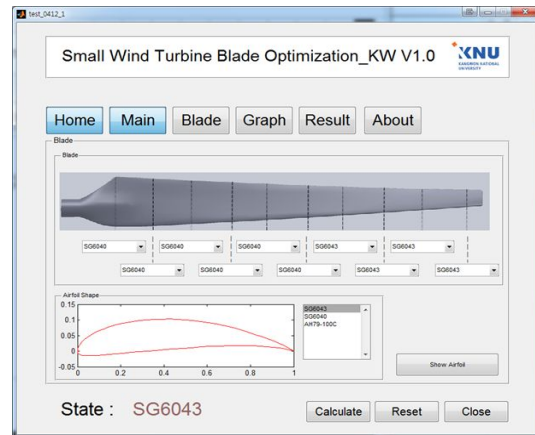


Fig. 2 Startup view of developed program.

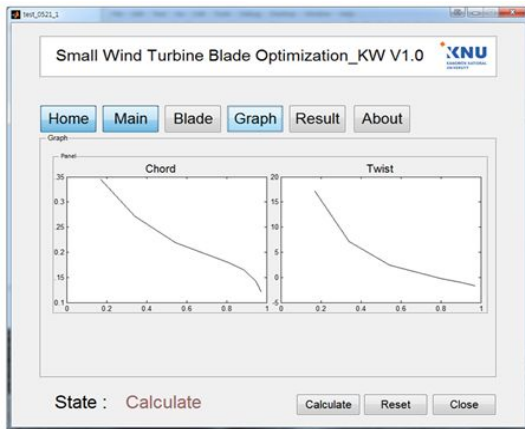
그림 3은 개발된 소형풍력발전기 공력설계 프로그램의 구성을 보여주고 있다. 그림 3(a)는 메인(Main) 탭에 대한 창으로서 각종 설계변수인 선단속도비, 정격풍속, 블레이드개수, 공기밀도, 공기점성도를 입력 받을 수 있도록 설계되었다. 그리고 수렴을 하기 위한 최대 반복 횟수를 입력받게 된다.



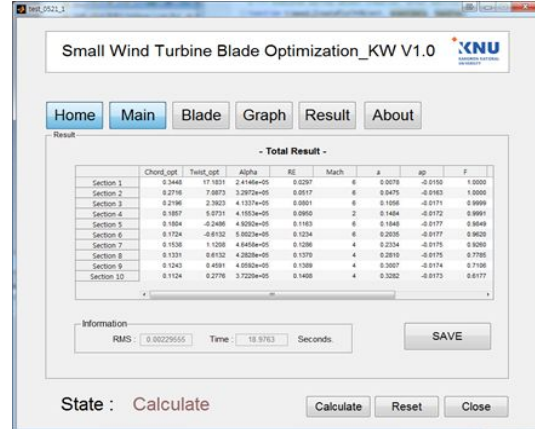
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Structure of developed program. (a) Main tab, (b) Blade tab, (c) Graph tab, (d) Table tab.

그림 3(b)는 블레이드(Blade) 탭에 대한 창으로서 블레이드의 섹션별로 익형을 선택할 수 있도록 하였으며, 사용자가 원하는 익형을 원하는 위치에 팝업메뉴(pop-up menu)를 이용하여 선택할 수 있도록 하였다. 또한 하단에는 우측의 목록창(list-box)을 이용하여 좌표값으로 저장되어있는 익형파일을 선택하고, 좌측의 화면을 통해 익형의 단면형상을 확인해 볼 수 있도록 하였다.

그림 3(c)는 그래프(Graph)에 대한 탭으로 그림 3(a), (b)에서 입력된 설계변수와 익형 정보를 바탕으로 Xfoil 과 연동하여 반복 계산을 수행한 결과를 보여 준다. 즉 블레이드

의 출력계수를 최대화하기 위한 시위와 비틀림각에 관한 계산결과를 그래프로 보여 줄 수 있도록 하였다.

그림 3(d)는 결과(Result)에 대한 탭으로 모든 계산 과정에서 나오는 시위길이, 비틀림각, 축 흐름유도계수, 회전 흐름유도계수, 레이놀즈수 등의 결과를 섹션별로 나누어 표로 나타내도록 하였다. 또한, 하단에는 수렴 시의 RMS 값 및 총 계산 시간도 표시하도록 하였다.

## 2.4 공력설계 프로그램 적용이론

본 연구에서 원하는 선단속도비에서 블레

이드의 출력계수를 최대화하기 위한 익형의 시위의 길이와 비틀림 각을 계산하기 위해 적용된 공력설계 이론은 다음과 같다.

(1) Twist 각의 결정

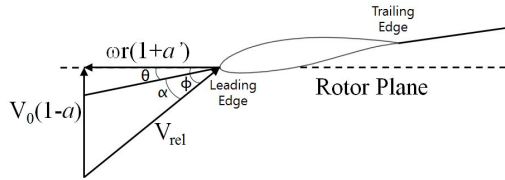


Fig. 4 Velocities at rotor plane.

그림 4는 로터가 회전할 때 블레이드 단면인 익형(airfoil) 형상이 받는 속도와 이와 관련된 여러 각을 나타낸다. 그림에서  $V_0$ 는 자유 흐름속도,  $V_{rel}$ 은 자유흐름 속도에 회전하는 로터가 받게 되는 로터 평면과 평행한 방향의 흐름속도가 더해진 상대속도를 나타낸다. 그림에서  $\theta$ 는 피치각(pitch angle)을 나타내고  $\alpha$ 는 받음각(angle of attack)을 나타낸다. 따라서 상대속도  $V_{rel}$ 에 대한 로터평면(rotor plane)상에 유동각(flow angle;  $\phi$ )은 식 (1)을 사용해서 구할 수 있다 [7].

$$\tan\phi = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\omega r} \quad (1)$$

여기서의 축 흐름유도계수(axial flow induction factor;  $a$ )와 회전 흐름유도계수(tangential induction factor;  $a'$ )는 블레이드요소 운동량 이론(BEMT: Blade Element Momentum Theory)으로부터 유도되어진 식을 이용하여 각각 Section

$$a = \frac{1}{\frac{4\sin^2\phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (2)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4\sin\phi\cos\phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (3)$$

별로 계산하게 된다.  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 를 계산한 이후 각 Section 별로 유동각( $\phi$ )값이 계산될 수 있다. 또한 유동각( $\phi$ )을 아래의 두식에 대입하여 수직하중계수(normal load coefficient)  $C_n$ 과, 접선하중계수(tangential load coefficient)  $C_t$ 를 계산한다.

$$C_n = C_{l,opt}\cos(\phi) + C_{d,opt}\sin(\phi) \quad (4)$$

$$C_t = C_{l,opt}\sin(\phi) + C_{d,opt}\cos(\phi) \quad (5)$$

특히 여기서  $C_n$ (normal load coefficient)값은 시위(chord) 길이를 계산하는데 사용된다.

따라서 각각 Section에서의 비틀림 각은 그림 4에서 알 수 있듯이, 유동각( $\phi$ )과 익형의 양향비가 최대가 되는 받음각( $\alpha_{opt}$ )과의 차로써 계산될 수 있다.

$$\theta_{opt} = \phi - \alpha_{opt} \quad (6)$$

(2) Chord 길이 결정

식 (7)을 사용하여 루트방향 각 Section 별로 무차원화 된 시위길이를 계산 할 수 있다.

$$\frac{c(x)}{R} = \frac{F \cdot 8\pi a x \sin^2\phi}{(1-a)NC_n\lambda} \quad (7)$$

여기서  $x$ 는 국부선단속도비(local tip speed ratio)를 나타내며,  $N$ 은 블레이드의 개수를 나타낸다. 선단속도비(TSR)는 수평축 풍력 발전기의 경우 보통 5~8을 범위를 초기 값으로 잡는다[8]. 그리고  $F$ 는 Ludwig Prandtl이 제시한 블레이드 끝 손실계수(Prandtl's tip loss factor)이며, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\mu) = \frac{2}{\pi} \cos\left[e^{-N/2(\mu-\mu_R/\mu)\sqrt{1+(\lambda\mu)^2/(1-a)^2}}\right] \quad (8)$$

여기서  $\mu$ 는 허브에서 팁까지 블레이드 국

부 위치를 블레이드 길이로 무차원한 변수를 나타내며, 각 Section마다 계산되어진다. 식 (8)에서 최종 손실계수 F 는 반복 수렴계산 (iteration)을 통해 얻어진다.

각 Section에서의 최적화된 시위길이를 계산하기위하여, 계산 전 익형을 먼저 선택하여야 하며, 블레이드 길이 R, 개수 N 등의 변수 또한 결정해 주어야한다.

### 3. 검 증

본 연구에서 개발된 공력설계 프로그램의 성능을 검증하기 위해, 표1과 같이 정격풍속 6m/s, 최대 효율을 내는 TSR 은 8.2, 그리고 로터직경은 2m 인 임의로 설정 된 조건을 이용하여, 블레이드 공력설계를 수행하였다.

Table. 1 Design parameters

Parameter	value
Rated wind speed ( m/s )	6
Design TSR ( λ )	8.2
Blade length (m)	1
Number of blade	3
Air density (kg/m <sup>3</sup> )	1.23
Air viscosity (N·s/m <sup>2</sup> )	1.79e-5

블레이드 설계에 사용된 익형은 그림 5에서 보여진 것과 같이 소형풍력발전기의 운전 조건인 저 레이놀즈수에 맞게 일리노이대학 (Illinois Univ.)에서 개발된 익형인 SG6043과 SG6040을 사용하였다[9].

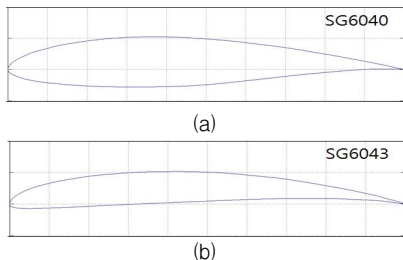


Fig. 5 Schematic of SG6040 (a) and SG6043 airfoil(b)

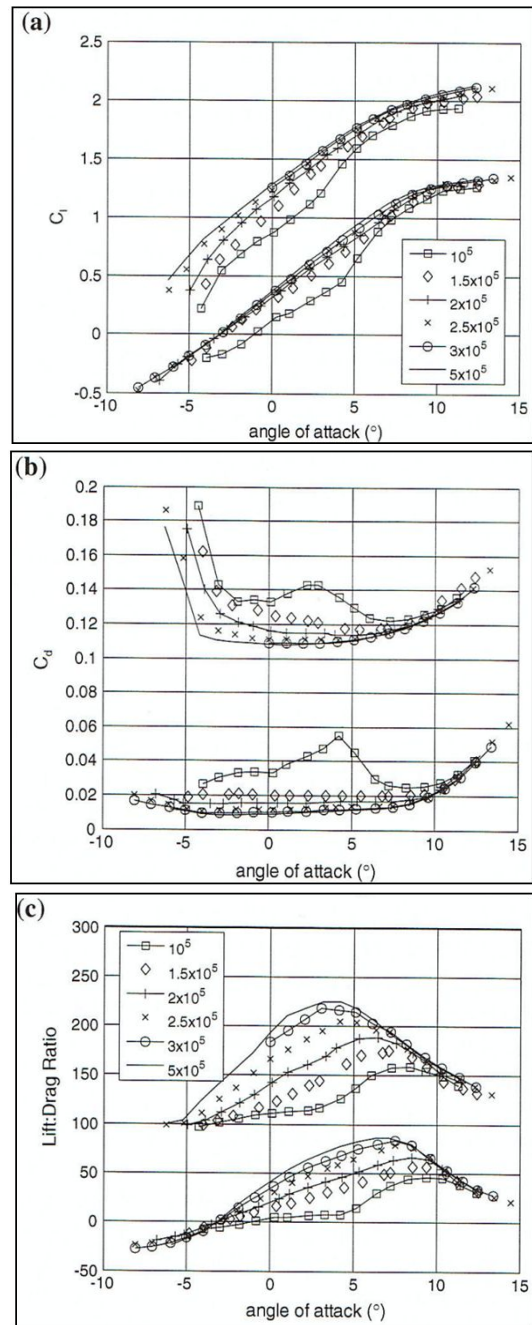


Fig. 6 Lift and drag coefficients of SG6040 and SG6043 airfoils. (a)Lift coefficient of the SG6040 airfoil(bottom) and SG6043 airfoil(top). (b) Drag coefficient of the SG6040 (bottom) and SG6043 airfoil. (c) Lift/ Drag ratio of the SG6040(bottom) and SG6043 airfoil. [9]

블레이드의 루트부에서 팁 쪽으로 70%의 지점은 구조적으로 안정된 설계를 위해 두께비가 좋은 SG6040을 사용하였고, 이후 30%의 위치에서는 양향비가 좋은 SG6043을 사용하였다.

SG6040, SG6043 두 익형에 대한 양력계수, 항력계수, 그리고 양향비 특성이 그림 6에 제시되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이 레이놀즈수의 변화에 따라 익형의 특성이 크게 변화하는 것을 알 수 있다.

### 3.1 블레이드의 공력설계

블레이드의 공력설계를 위해, 블레이드의 섹션을 10개로 나누었으며, 각 Section별의 최적 시위각이와 비틀림 각을 공력설계 프로그램으로 계산하였다. 최적 시위각이의 분포는 팁에서 루트부로 갈수록 급격히 증가하는 경향을 보이는데, 이는 공기역학적인 설계만 고려하였기 때문이다.

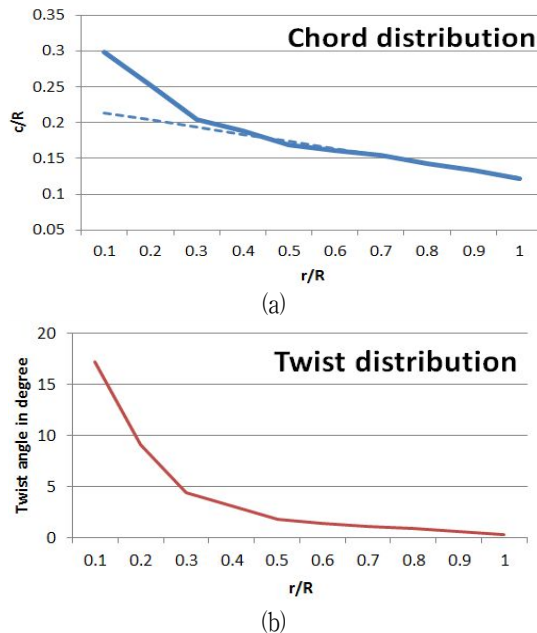


Fig. 7 Chord and twist distribution of optimized blade. (a)Chord distribution, (b)Twist distribution in optimization design.

실제 소형풍력발전기 블레이드의 시위각이 분포는 복합적인 구조적 안전성, 제조 용이성, 비용의 절감 등을 고려하여 공기역학적인 성능이 가장 고려되는 부분인 허브로부터 블레이드 팁까지의 70~90% 사이의 영역을 기준으로 선형 외삽을 그림 7(a)와 같이 수행하여 결정하게 된다[10].

그림 7(a)에서 실선은 공력만을 고려했을 경우 최적화된 블레이드의 시위각이 분포 결과를 나타내며, 점선은 선형 외삽을 수행한 최적 시위각이분포를 보여준다.

그림 7(b)는 최적화된 블레이드의 비틀림 각 분포 결과를 나타내며, 그림 7(a) 와 7(b)에서 블레이드 길이는 무차원화 된 길이( $r/R$ )로 표현하였다.

### 3.2 GH Bladed를 이용한 검증

개발된 소형풍력발전기 공력설계 프로그램에서 설계된 블레이드가 표1의 설계 선단속도비에서 최대 출력계수를 갖도록 설계되었는지를 검증하기 위해 국제적으로 정확도를 인증 받은 GH Bladed 프로그램을 이용하여 설계된 블레이드의 성능을 예측하였다.

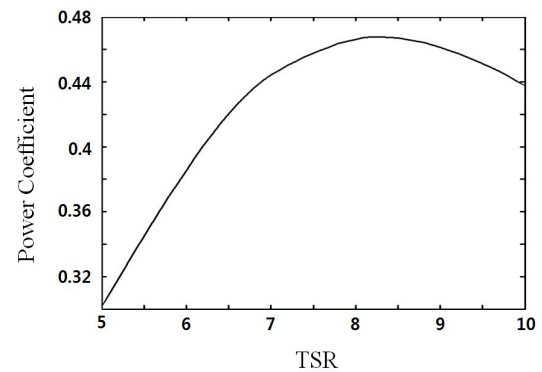


Fig. 8 Power coefficient vs. Tip speed ratio calculated using GH Bladed. Results obtained from the developed program were used as inputs to GH Bladed.

그림 8은 GH Bladed에서 계산된 설계된

소형풍력발전기 블레이드의 출력계수를 나타낸다. 공력설계 프로그램에서 얻어진 블레이드의 각 섹션에서의 비틀림각과 시위길이 가 GH Bladed 의 블레이드 입력 값으로 사용되었다. 그림에서 알 수 있듯이 표1의 설계변수인 선단속도비 8.2에서 최대 출력계수값(power coefficient ;  $C_p$ )을 보이고 있으며, 최대 출력계수는 약 0.46을 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 매트랩 GUI 기반의 소형 풍력발전기 블레이드의 공력설계를 위한 프로그램을 개발하였다. 개발된 공력설계 프로그램에서는 주어진 선단속도비와 정격풍속에 대해 블레이드의 출력계수를 최대로 하기 위한 비틀림 각과 익형의 시위의 길이를 계산하게 되며, 계산 과정에서의 값이 변하게 되는 레이놀즈수와 받음각에 대한 양력계수와 항력계수 값은 Xfoil 프로그램과 연동하여 그 값을 얻어내게 된다.

또한 본 연구에서는 개발된 프로그램에서 얻어진 결과를 GH Bladed 프로그램에 적용하여 공력설계에 대한 검증을 수행하였으며, 설계변수를 정확히 만족하는 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 대형풍력발전기 블레이드와 달리 레이놀즈 수의 변화에 따라 공력 성능이 크게 변화하는 소형풍력발전기 블레이드의 공력설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 2011(3차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20093021020030). 본 논문은 2012년 한국 풍력에너지학회 춘계학술대회에서 발표되었습니다.

#### References

1. H. Abbott, E.Von Doenhoff, Theory of wing section; including a summary of airfoil data, Mineola, NY, Courier Dover Pub., 1959.
2. Sommers D.M, Design and Experimental Results for the S809 airfoil, NREL/CP-500-36900, 2002.
3. Bang, J.H., A study on design and analysis of small wind turbine for high efficiency and light weight, Ph.D. Dissertation, Chosun University, 2004.
4. Sun, M.Y., Kim, D.Y. and Lim, J.K., Study on Optimal Design of Wind Turbine Blade Airfoil and Its Application, Transactions of the KSME B, Vol. 36, No. 5, 465~472, 2012.
5. Bottasso, C.L., Campagnolo, F., Croce, A., and Maffenini, L. Development of a Wind Tunnel Model for Supporting Research on Aero-servo-elasticity and Control of Wind Turbines, 13th International Conference on Wind Engineering, ICWE13, Amsterdam, The Netherlands, 2011.
6. Program and manual available online at <http://raphael.mit.edu/xfoil>.
7. Hansen, M.O.L., Aerodynamics of Wind Turbines 2nd Ed., Earthscan, London, 2008.
8. Kim, B.S., A study on the optimum blade design and the aerodynamic analysis for the HAWT, Ph.D. Dissertation, Korea Maritime University, 2005.
9. Wood, D., Small Wind turbine: Analysis, Design, and Application, London, Springer, 2011.
10. Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., and Bossanyi, E., Wind Energy Handbook 2nd Ed., Wiley&Sons, Hoboken, NJ, 2011.