

## 소형 수직풍력터빈 설계를 위한 공기역학적 고찰

이 용교<sup>1)</sup>, 김 철완<sup>2)</sup>

### Aerodynamic Perspectives for Design of Small Vertical Wind Turbine

Yung-Gyo Lee, Cheolwan Kim

**Key words** : CFD(전산유체역학), Vertical Wind Turbine(수직풍력터빈), Pitch Angle(붙임각)

**Abstract** : 소형 풍력터빈 설계 시 고려해야 할 익형의 선택, 익형의 붙임각 및 Solidity 등이 터빈의 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 한 개의 익형에 대한 공력계수를 이용하여 수학적 모델링을 통하여 최적 붙임각을 예측하여 경향을 파악하였다. 받음각에 따른 익형의 공력특성을 CFD 기법으로 파악한 후 5개의 Blade를 갖는 Turbine의 성능을 익형의 붙임각에 따라 파악하여 최대 성능을 갖는 붙임각을 최종 산출하였다. 익형 선정시 받음각에 대한 양력/항력 곡선을 이동시키는 캠버 익형의 기능보다는 항력 대 양력의 비(L/D)가 최대인 익형을 선정하는 것이 더욱 중요하며, Blade수가 적을수록 Torque의 양은 증가하고 Blade가 6이상이면 효율이 급격히 감소함을 알 수 있다.

#### 1. 서 론

수직 풍력터빈은 풍향의 변화에 따른 성능 저하 등의 어려움이 없고 낮은 풍속에서도 가동이 가능한 장점을 가지고 있어 소형 발전용으로 주로 사용되고 있다. 또한 형상은 크게 Darrieus형과 Savornius형으로 나뉘는데 Darrieus형은 Blade에 발생하는 수직력(양력)을 이용하여 회전력을 발생하고 Savornius형은 Blade에 발생하는 항력을 이용하여 터빈을 회전시킨다. 따라서 설계하고자 하는 형태에 따라 고려해야 하는 요소들도 달라지는데 Darrieus형은 보다 많은 양력을 얻을 수 있는 익형을 채택하고 있다. 익형에 따라 발생하는 양력도 달라지므로 Darrieus형의 풍력터빈을 설계할 때는 익형에 대한 세심한 고려가 필수적이다.

본 연구에서는 Darrieus형 풍력터빈을 설계할 때 고려해야 할 익형의 공력특성, 붙임각 및 Solidity 등에 대해 알아보려고 하는데 연구에 필요한 기본 형상은 보성 파워텍에서 개발하고 있는 300W 급 소형 수직 풍력터빈을 기초로 하였다. Fig. 1은 보성파워텍의 풍력터빈의 사진인데 5개의 Blade를 장착하였고 한 Blade의 Chord 길이는 220mm, 회전반경은 약 690mm, 회전면과의 붙임각은 5°이다. 연구 진행은 먼저 최적 붙임각을 파악하기위해서 익형의 공력특성을 붙임각에

따라 적분해서 발생하는 블레이드의 토크를 계산하였고 이를 확인하고 Solidity 및 블레이드 수가 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 2차원 블레이드 단면에 대한 CFD 해석을 수행하였다. 계산 격자 생성에는 비정렬 격자 생성기인 Gambit 및 Navier-Stokes Code인 Fluent를 사용하였다.

#### 2. 최적 붙임각 산출

최적 붙임각 산출을 위하여 다음과 같이 회전하는 에어포일을 수학적으로 모델링하여 최적 붙임각을 예측하였다.

##### 2.1 수학적 모델링

최적 붙임각 산출을 위하여 다음과 같이 회전하는 에어포일을 수학적으로 모델링하였다.

익형의 윗면이 회전중심을 향하고 있는 것으로 가정하였으며, 여기서,  $\theta$ 는 방위각(azimuth angle)이고,  $\omega$ 는 각속도( $195\text{RPM} \times 2\pi/60$ )이며,  $V_\infty$ 는 자유류 속도(10m/s)를 나타낸다.  $V_R$ 은 회전과 자유류 속도의 합으로서, 익형에 대한 상대속도로서 다음과 같이 계산된다.

- 
- 1) 한국항공우주연구원 첨단공력구조팀  
E-mail : lyg@kari.re.kr  
Tel : (042)860-2353 Fax : (042)860-2604
  - 2) 한국항공우주연구원 첨단공력구조팀  
E-mail : cwkim@kari.re.kr  
Tel : (042)860-2691 Fax : (042)860-2604

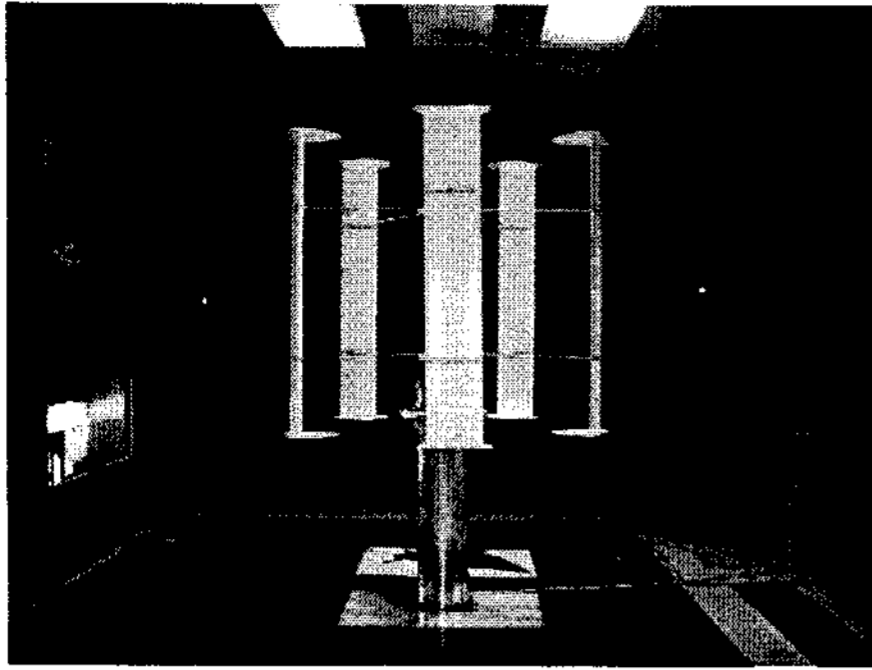


Fig. 1 Wind Turbine of Bosung PowerTec installed at KARI Wind Tunnel

$$V_R = \sqrt{(R\omega \cos\theta + V_\infty)^2 + (R\omega \sin\theta)^2}$$

R은 회전반경으로 0.69m이고,  $\gamma$ 는 회전의 접선과  $V_R$ 이 이루는 각도로서,

$$\gamma = \theta - \tan^{-1}\left(\frac{R\omega \sin\theta}{R\omega \cos\theta + V_R}\right)$$

로 계산되며, 불임각( $\beta$ )가 없을 경우 받음각( $\alpha$ )과 동일하다, 즉,  $\alpha = \gamma + \beta$ 이다.

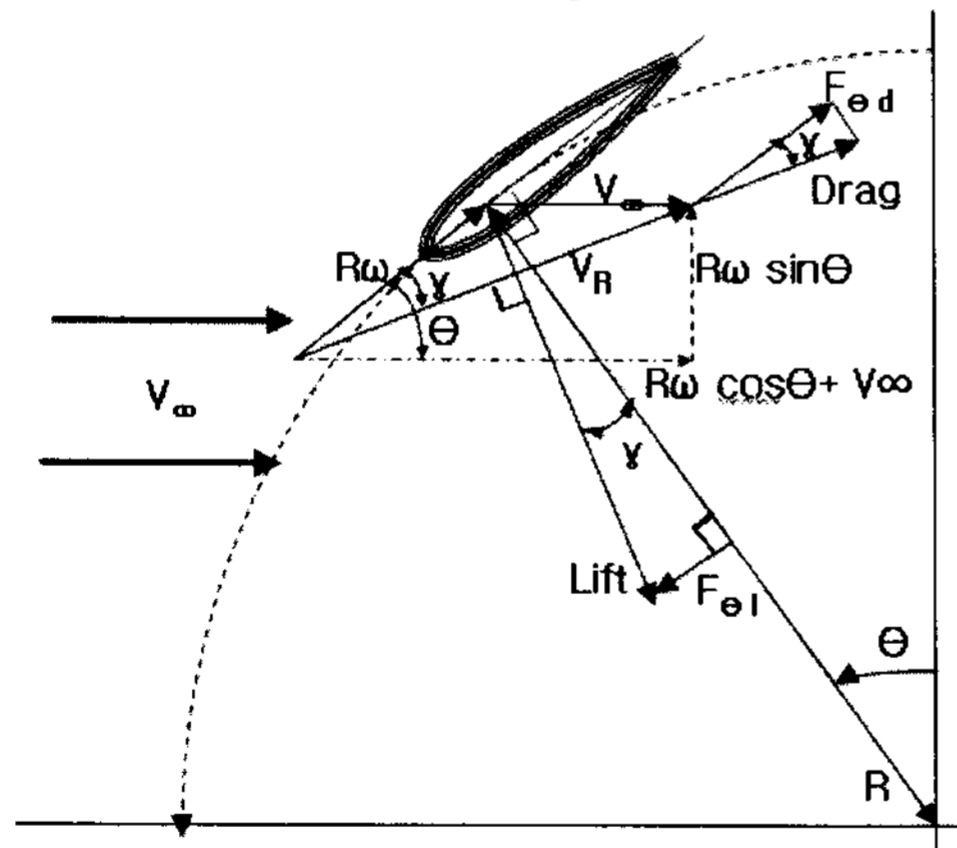


Fig. 2 Diagram for a Rotating Airfoil

회전하는 익형에 의한 힘은 반경방향과 회전 방향( $F_\theta$ )방향의 힘으로 이루어지나, 여기서는 회전방향의 힘만이 중요하다.

$$F_\theta = F_{\theta l} + F_{\theta d} = Lift * \sin\gamma - Drag * \cos\gamma$$

$$= 0.5\rho V_R^2 c(c_l(\alpha)\sin\gamma - c_d(\alpha)\cos\gamma)$$

여기서, c는 익형의 코드로서, 0.22m이고, 한 개의 익형에 의한 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$Power(watt) = n(rps) \int_0^{2\pi}$$

## 2.2 최적 불임각 계산 결과

이상의 모델을 이용하여, 불임각에 따른 출력을 계산하여 최적의 불임각을 예측하였다. 우선, 본 연구에서는 대칭 익형과 캠버 익형의 두가지에 대하여 계산을 수행하여 각각의 특성을 비교하였다. 캠버 익형의 양력계수는 받음각 0도에서 0.5가량 위로 이동하여 있으며, 항력계수도 미세하게 양의 받음각 방향으로 옮겨져 있음을 알 수 있다.

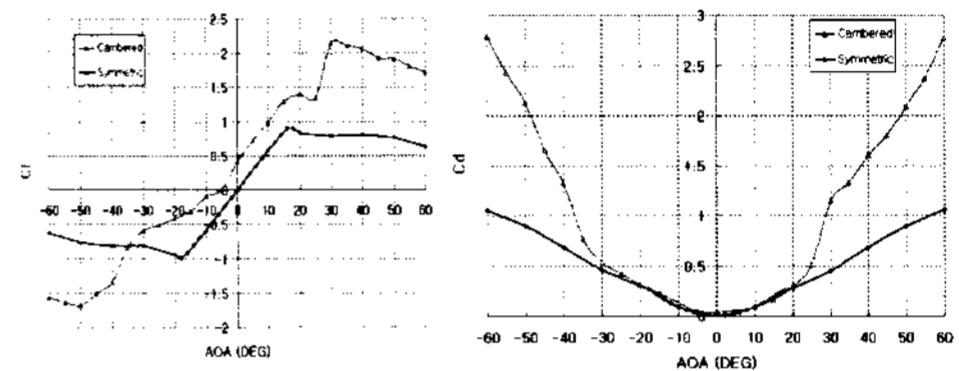


Fig. 3 Lift and Drag of Airfoils

위의 두가지 익형에 대하여, 그리고, 캠버 익형의 뒤집혀진 형상, 즉 익형의 아랫면이 회전중심을 향하는 경우에 대하여 받음각(불임각=0)과 회전방향( $F_\theta$ )방향의 힘을 방위각에 대하여 Fig. 4와 5에 각각 도시하였다.

불임각이 없을 경우 받음각은 두가지 익형에 대하여 동일하며, 뒤집혀진 익형의 경우는 받음각이 반대로 나타난다.

반경방향의 힘  $F_\theta$ 를 살펴보면, 대칭익형의 경우는 방위각 180도를 기준으로 힘도 대칭으로 나타나며, 캠버 익형은 180도까지는 출력을 생성하지만, 그 이후로는 오히려 출력을 감소시키고 있음을 알 수 있다.

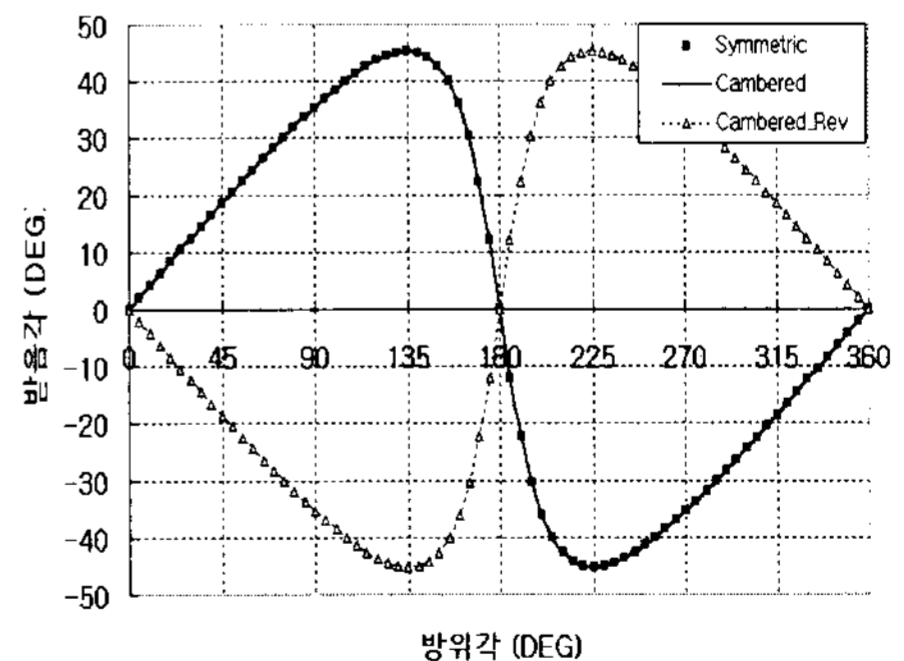


Fig. 4 Angle of Attack and Azimuth Angle

불임각을 변화시키면서 출력을 도시함으로써 최적의 불임각을 산출하였다. 대칭익형의 경우 불임각이 없는 경우 모든 방위각에서 출력을 발생시키며(Fig. 5) 최대 출력을 산출하였다. 캠버 익형은 약 -3도, 뒤집혀진 캠버익형은 3도, 즉 받음각을 3도 줄이는 경우 최대의 출력을 나타내는데, 이는 캠버 효과가 없을 경우 최대 출력을 나타낸다는 것을 의미한다.

캠버 익형은 항공기에 적용될 경우, 순항시의 양력조건에서 최소 항력계수가 발생하도록 조절하는 기능이 있으나, 광범위한 받음각에 대하여 고르게 작동하는 수직 풍력터빈에서는 캠버 익형의 이러한 기능이 반드시 필요한지 생각해 보아야 하며, 가장 중요한 것은 항력대 양력의 비(L/D)가 최대인 익형을 선정하는 것이 더욱 중요하다고 할 것이다.

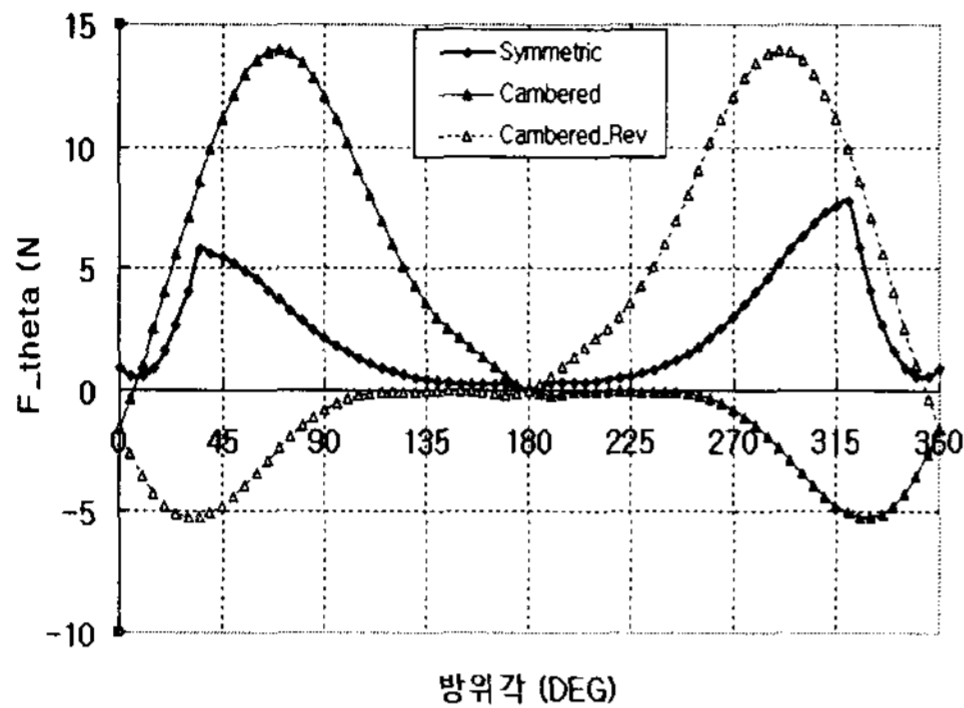


Fig. 5  $F_\theta$  and Azimuth Angle ( $\beta=0$ )

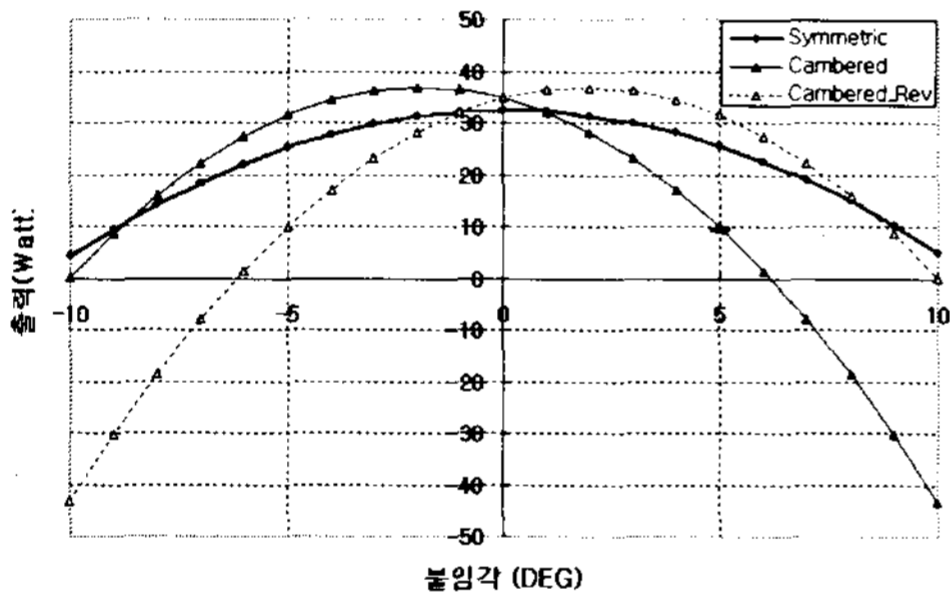


Fig. 6 Power for Various Pitch Angle,  $\beta$

### 3. 설계 변수 분석을 위한 전산해석

본 Section에서는 여러 가지 설계 변수(받음각, Solidity 및 Blade 수 등) 분석을 위한 전산해석을 수행하였다. 전산해석은 2차원 Wind Turbine 단면에 대해 수행되었다.

#### 3.1 계산 격자 및 수치해석

Fig.7과 8은 2차원 Blade해석을 위해 형성한 계산격자를 보여준다. Airfoil면에는 260개의 격자점을 분포하였고 익형 주위의 점성 유동 해석을 위해 약 26층의 경계층 격자를 분포하였다. 익형 주위는 삼각격자를 원방 경계 부근은 사각 격자를 이용하여 계산 격자를 완성하였는데 총 격자수는 약 23만개이다.

블레이드의 회전을 모사하기 위해 Sliding Grid Technique을 적용하였는데 이는 회전을 하는 격자와 외부 격자사이에 Interface를 설정하여 두 격자계가 틈이 없이 서로 미끄러지게 하였다. 난류 모델은 Realizable K-Epsilon 방법을

채택하였는데 블레이드가 큰 받음각에서도 Wake 영역을 안정적으로 모사하기 위함이다.

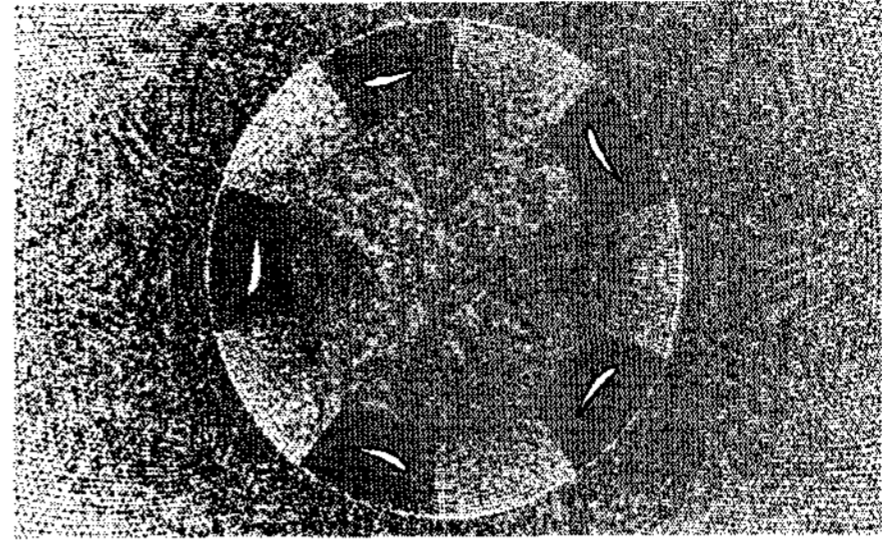


Fig. 7 Grid System around Turbine Blades

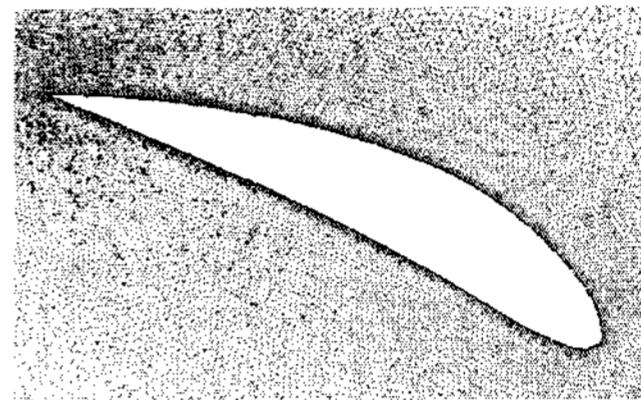


Fig. 8 Grid Distribution around Blade

#### 3.2 받음각 변화에 따른 전산해석

최적 받음각을 산출하기 위해 받음각을 1도에서 15도 까지 2도 간격으로 변화시키며 전산해석을 수행하여 블레이드의 토크를 산출하였다. 블레이드의 회전방향은 반시계방향이고 회전속도는 195 RPM이다. 또한 자유류는 왼쪽에서 오른쪽으로

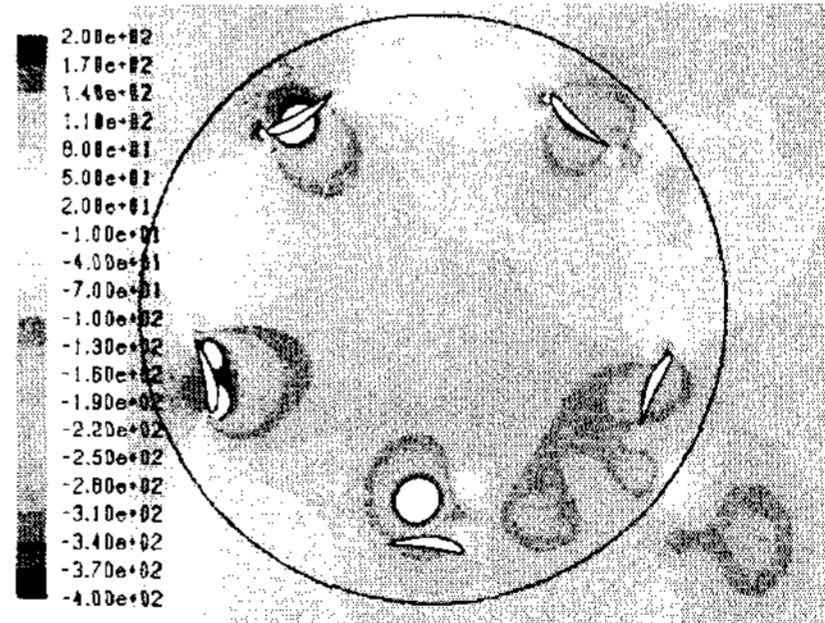


Fig.9 Pressure Contour around Blade

로 향하고 속도는 10m/s이다.

Fig.9는 받음각이 5도일 때 압력분포를 나타낸 것인데 블레이드가 우측에 위치할때는 유동에 대한 받음각이 증가하여 Blade 주위의 압력이 크게 진동하는 것을 볼 수 있다. Fig.10은 블레이드 주위의 속도 분포를 보여주는데 블레이드 후면의 유동이 크게 진동함을 알 수 있고 블레이드 하단의 유동속도가 크게 증가함을 알 수 있다. 회전하는 Blade가 유동의 진입을 막아 Blade 안쪽의 유동은 속도가 크게 감소함을 알 수 있다. Fig. 11은 받음각에 따른 토크의 분포를 보여준다. 받음각의 크기가 3도와 7도 사이에서 토크가

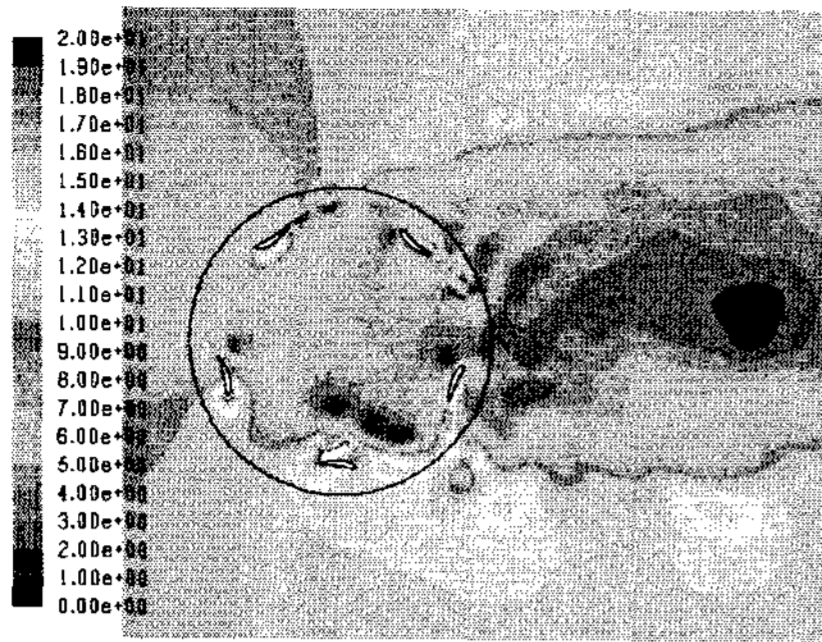


Fig. 10 Velocity Contour around Blade

거의 변화없이 일정한 값을 갖지만 불임각이 이 범위를 벗어나면 토크가 크게 감소함을 알 수 있다. 그러나 최적 불임각 크기는 Blade 익형에 따른 달라질 수 있다. Camber가 없는 대칭익형을 사용한다면 최적 불임각은 0°가 될 것이다.

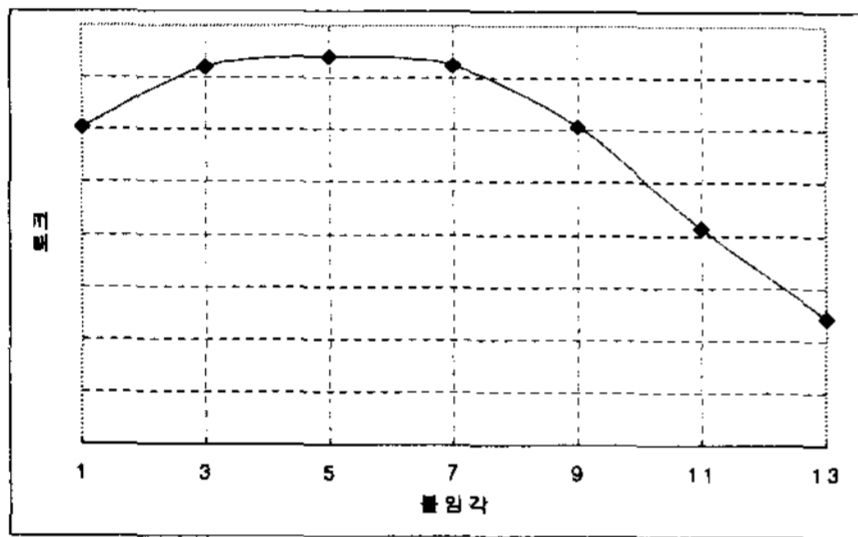


Fig. 11 Torque of Turbine versus  $\beta$

### 3.3 Solidity 변화에 따른 전산해석

블레이드의 수나 불임각은 변화를 주지 않고 각 Blade의 Chord를 변화시키며, 즉 Solidity를 변화시키며 이에 따른 Torque의 변화를 분석하였다. Fig.12에 보이듯이 Solidity가 0.2에서 0.3 사이 값을 갖을 때 가장 큰 Torque를 발생함을 알 수 있다. Solidity가 이 범위를 벗어나면 Torque가 급격하게 감소함을 알 수 있다. Solidity가 큰 경우 Blade가 유동의 흐름을 방해하여 Torque 발생이 원활하지 못하기 때문으로 판단된다.

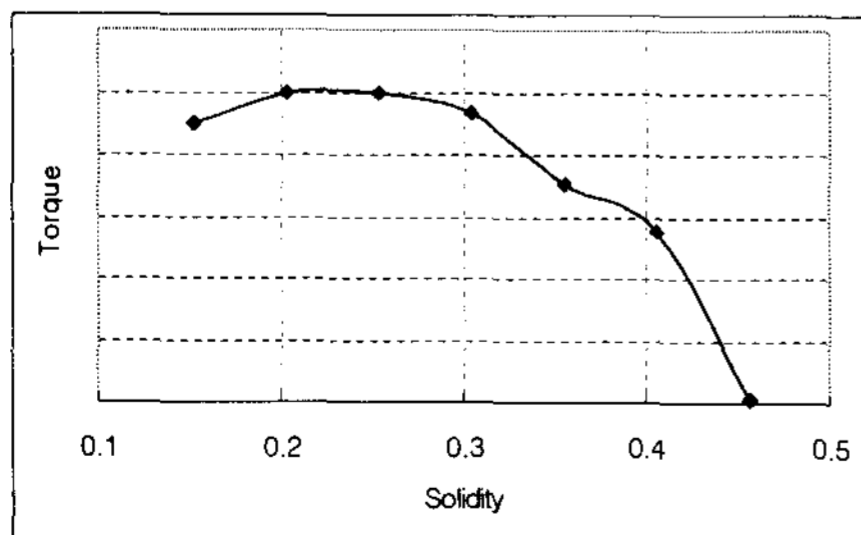


Fig. 12 Torque of Turbine vs. Solidity

### 3.4 Blade 수 변화에 따른 전산해석

Solidity를 일정하게 유지하며 Blade의 수를 3에서 7까지 변화시키며 발생하는 Torque의 변화를 관찰하였다. Fig.13에 보이듯이 Blade수가 적을수록 Torque의 양은 증가하고 Blade가 6이상이면 효율이 급격히 감소함을 알 수 있다.

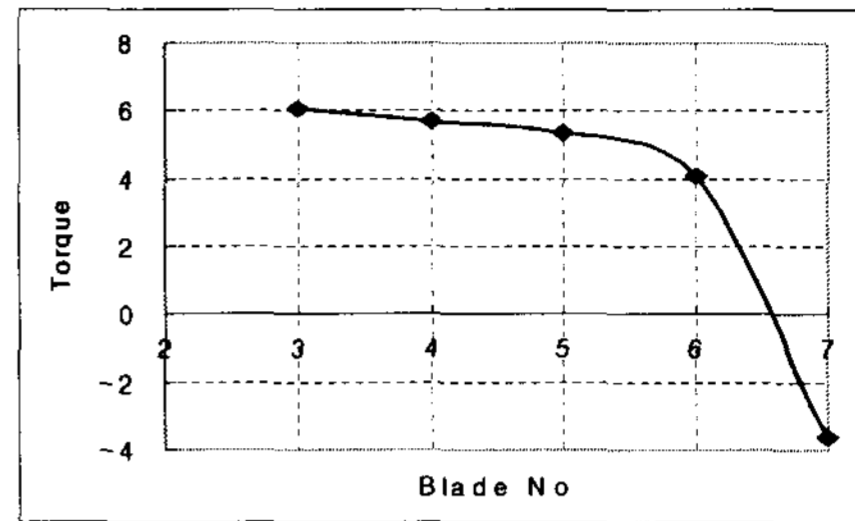


Fig. 13 Torque of Turbine vs. Blade No.

따라서 Blade수가 적을수록 터빈의 효율은 증가하지만 이에 비례하여 진동이 크게 발생함을 확인하였다. 따라서 터빈의 효율과 진동을 감안하여 Blade수를 정하는 것이 중요하다.

## 4. 결론

익형의 최적 불임각을 예측하기 위해서는 광범위한 받음각의 익형 공력특성이 필요하며 익형 선정시 받음각에 대한 양력/항력 곡선을 이동시키는 캠버 익형의 기능보다는 항력 대 양력의 비 (L/D)가 최대인 익형을 선정하는 것이 더욱 중요하다. 또한 Turbine 설계시 Solidity는 0.2와 0.3 사이의 값을 갖는 것이 중요하고 Blade수는 효율과 진동문제를 함께 고려하여 정하여야 한다.

## 후기

본 연구는 '프로펠터/풍력터빈 공력/소음 풍동 시험기술 연구'의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- [1] Ion Paraschivoiu, "Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept", Polytechnic International Press
- [2] 조태환, 장병희, "KARI LSWT 표준풍력터빈 풍동시험", 한국신재생에너지학회지, 2007.12
- [3] M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck, and S.M. Larwood, 2001, "Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns", NREL/TP-500-29955
- [4] C. Lindenburg, 2004, "Modeling of rotational augmentation based on endengineering considerations and measurements", ECN-RX-04-131