

대형 풍력 블레이드의 CFD 해석에 관한 연구

*신 형기¹⁾, 방 형준²⁾, 김 현구³⁾, 김 석우⁴⁾, 배 일성⁵⁾, 최 준호⁶⁾

CFD analysis of large wind turbine blade

*Hyunki Shin, Hyungjun Bang, Hyungoo Kim, Seokwoo Kim, Ilsung Bae, Junho Choi

Key words : Wind Turbine(풍력발전기), Blade(블레이드), Design(설계), CFD(CFD)

Abstract : 본 연구에서는 BEMT와 gradient method를 이용하여 블레이드를 설계한 후 이에 대한 세밀한 유동장 해석을 위하여 CFD 기법을 적용하였다. CFD의 경우 해석시간의 문제로 설계단계에서의 적용에 어려움이 따른다. 따라서 설계 단계에서는 BEMT를 적용하는 것이 적절하다. 그러나 BEMT의 경우 기법의 한계로 인하여 세밀한 유동의 해석에 어려움이 따른다. CFD의 경우 전체 유동장 및 블레이드 표면에서의 자세한 물성치 분석에 유리한 점을 가진다. 본 연구에서는 두가지 해석 기법의 장점을 살려 설계단계에서는 BEMT를 적용후 결과물인 블레이드 형상에 대하여 CFD 해석을 수행하여 유동장 해석을 하였다.

1. 서론

풍력발전기의 개발에서 블레이드의 설계는 전체 성능 및 하중을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 본 논문에서는 대형 풍력발전기에 대해 블레이드의 설계 및 해석을 수행하였다. 블레이드의 설계는 계산 시간의 문제로 BEMT를 이용하게 된다. 그러나 BEMT의 경우 자세한 유동장의 해석이 불가능 하기 때문에 이에 대한 보완하기 위하여 설계된 블레이드에 대하여 CFD 해석을 수행하였다.

2. 블레이드 설계

블레이드 공력 형상 설계에서 결정해야하는 기본 변수는 블레이드 길이, 두께분포, 에어포일, 코드와 트위스트 분포이다. 이에 대한 설계의 기본적인 순서는 다음 그림 1과 같다.

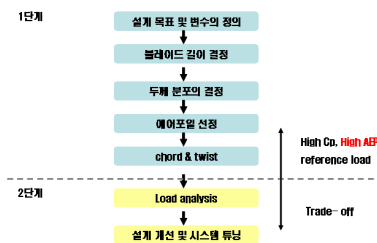


그림 1. 블레이드 설계 기본 절차

본설계의 블레이드 기본 설계 스펙은 다음과 같다.

항목	
Blade Number	3
Control type	pitch control, variable speed
Cut-in RPM	8
Rated RPM	15.7
Cut-in wind speed	3m/s
Cut-out wind speed	25m/s
Tip speed ratio	7.5

표 1. 블레이드 기본 요구 스펙

또한 블레이드 설계에 사용된 에어포일은 다음 표와 같다.

Airfoil set #1
Cylinder
DU 00-W-401
DU 97-W-300
DU 91W2-250
FFA-W3-211
DU 96-W-18

표 2. airfoil set

에어포일이 정하여진 후에는 블레이드의 코드 길이와 트위스트 분포를 결정하게 된다. 가변속, 피치제어 운전을 하는 블레이드에 대하여 코드 길이와 트위스트 분포는 교과서 적으로 정해지는 형상이 있지만 이는 최적 효율의 블레이드 설계를 위하여는 부족하다. 따라서 본 연구의 블레이드는 구배법을 기반으로 하여 블레이드의 각 단면별 코드 길이와 트위스트 각을 설계 변수로 하여 연간 에너지 생산량이 최대가 되도록 최적 설

계를 하였다. 이를 통하여 설계된 블레이드의 코드와 트위스트 분포는 다음 그림과 같다.

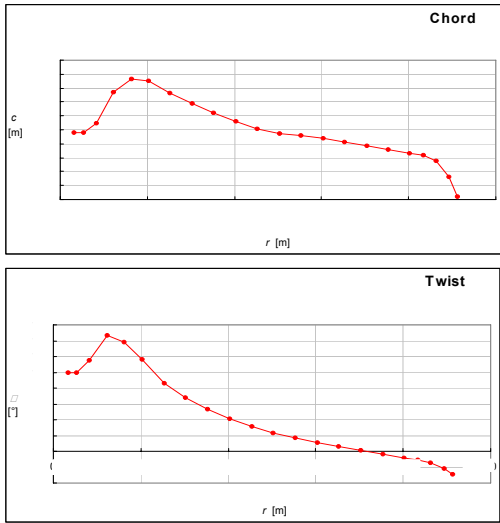


Fig. 3 설계 코드, 트위스트 분포

3. CFD 해석

3.1 해석 절차

해석 절차는 다음의 방법으로 진행한다. 기본적으로 CAD 형상을 CAD 정리 프로그램인 ANSA를 통해 불러들이며, 그 후 PRO-AM 및 STARCCM+를 통해 Fig 1의 절차를 따라서 격자를 생성한다. 이때 생성하는 격자의 형태는 Trimmed mesh 형태이며 CAD의 형상의 단순화 없이 모든 형상을 격자로 구성할 수 있다. 격자를 완성한 후 해석 모델 셋팅 및 경계조건의 설정은 STARCCM+를 통해서 진행하며, 해석 결과의 출력 또한 STARCCM+의 후처리 기능을 이용하여 처리한다. Blade의 거동을 모사하는 기법은 두 가지로 구분하여 STARCCM+에 적용한다. 실제로 격자를 움직이는 Rigid body motion 기법과, 격자는 움직이지 않으며 Blade의 움직임에 해당되는 momentum을 해석 영역에 적용시키는 Moving reference frame 기법으로 나뉜다.

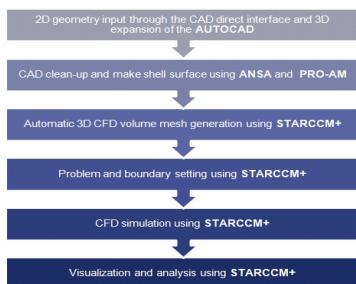


Fig 4. 해석 진행 절차

3.2 CFD 모델링 기법

(1) 지배 방정식

CFD 해석을 위한 지배 방정식은 다음과 같다.

운동량 보존 방정식의 source항(S_i)은 Blade의 거동을 momentum source로 modeling할 경우에만 해당된다. 실제로 격자를 움직이는 moving mesh기법을 사용할 경우 source항은 이용되지 않는다.

- Mass conservation Equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$$

- Momentum conservation Equation

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i$$

$$\text{stress tensor, } \tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

$$\text{strain tensor, } s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

- Turbulence Model :

기본적으로 Blade의 유동 특성은 복잡한 난류 거동을 보인다. 이에 따라 LES model을 사용하였다.

(2) 수치 차분법(Numerical Discretization)

주어진 지배방정식을 수치적으로 해석해 나가기 위해서는 지배방정식을 차분화 하여 각 항에 대해서 행렬식을 구성하고 풀어 나가야 한다. 일반적인 형태의 지배방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \text{div} (\rho \tilde{u}_i \phi - \Gamma_\phi \text{grad} \phi) = s_\phi$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S (\rho \tilde{u}_i \phi - \Gamma_\phi \text{grad} \phi) \cdot d\tilde{S} = \int_V s_\phi dV$$

첫 번째 항은 시간항을 나타내며 두 번째 항은 대류항을 나타낸다. 세 번째 항은 확산을 영향을 나타내며 마지막 항은 source항을 나타낸다. 일반적으로 시간항을 분리하여 해석하고, 공간항인 대류항 및 확산항을 분리하여 차분화 한다. 마지막으로 source항을 분리하여 해석해 나간다. 본 연구에서는 지배방정식을 풀기 위해서 각 항에 대해서 다음의 수치 도식(scheme)을 사용하였다.

- 시간 차분법 (Temporal Discretization)

시간항의 이산화를 위해서 Euler Implicit scheme을 사용하였다. Euler implicit scheme은 시간항을 계산하기 위해서 이전 시간(n-1)에서의 결과와 주변 격자의 값들을 이용하여 계산해 나

가는 도식이다.

- 공간 차분법(Spatial Flux Discretization)

공간항인 대류항(Convective flux)과 확산항(Diffusive flux)의 해석을 위해서 상류도식(Upwind Scheme)을 사용하였다. 상류도식은 공간상의 상류에 위치한 유동이 하류에 지배적으로 영향을 미친다는 가정으로부터 개발된 도식으로, 다음 그림에서와 같이 Face j를 통해서 흘러가는 flux의 방향을 구하여 공간상의 상류쪽에 위치한 값을 하류에 위치한 격자에 넣어주는 도식이다. 상류도식은 구현이 용이하고 수렴성이 좋으며 해석 비용이 적게 든다는 장점으로 산업계에서 사용하는 대부분의 CFD 해석 도식으로 이용되고 있다.

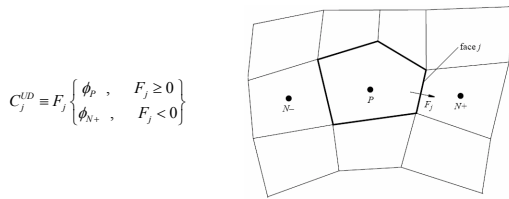


Fig 5. Upwind scheme의 설명

3.3 해석 결과

해석을 위하여 volume mesh는 trimmed mesh로 580만개의 mesh로 구성된다. 그림에서 보는 것과 같이 블레이드 주위와 주변에 대하여 서로 다른 mesh를 모으게 된다.

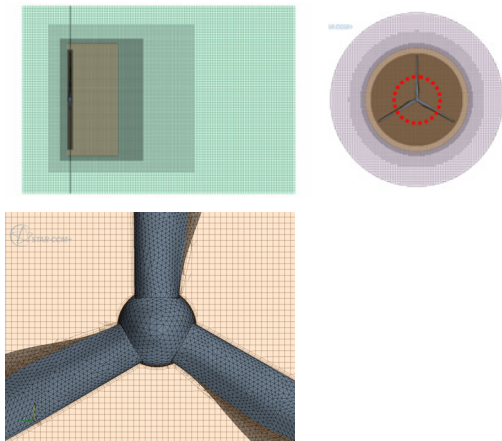


Fig 6. surface pressure & stream line

해석을 통하여 블레이드 표면의 압력 분포와 유동장 분포를 살펴보면 다음 그림과 같다.

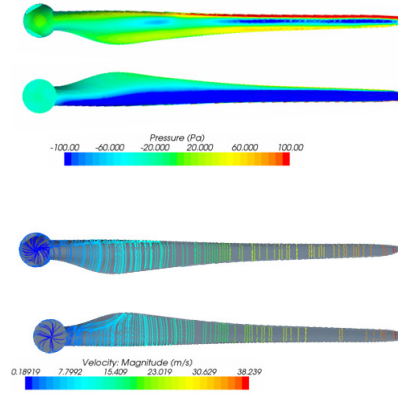


Fig 7. surface pressure & stream line

그림에서 알 수 있듯이 블레이드 루트 부분에서는 유동이 블레이드의 코드 방향에 대해서 평행하지 않게 흐르게 된다. 따라서 압력 분포에 영향을 주어 블레이드 전체 성능의 변화를 가져온다. 이는 BEMT에서는 기법상의 한계로 고려할 수 없는 문제이며 CFD 해석을 통하여 고찰할 수 있는 문제이다.

다음 그림은 vorticity contour를 보여주고 있다. 회전익 블레이드의 경우 tip vortex의 해석이 중요하며 이는 전체 유동장과 성능에 영향을 주게 된다. 그러나 CFD 해석은 수치적 소산으로 인하여 tip vortex의 해석에 어려움을 가지게 된다. 본 해석의 경우 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 어느 정도의 해석은 가능하나 뒤쪽으로 가면 소산되어 vorticity contour를 볼 수 없다. 차후에는 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

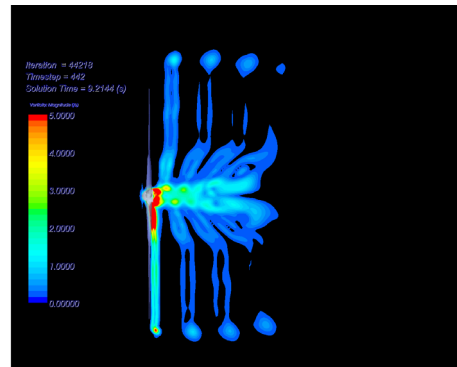


Fig 8. Vorticity contour

4. 결론

본 연구에서는 BEMT와 gradient method를 이용하여 블레이드를 설계한 후 이에 대한 세밀한 유동장 해석을 위하여 CFD 기법을 적용하였다. CFD의 경우 해석시간의 문제로 설계단계에서의 적용에 어려움이 따른다. 그러나 연구결과에서 볼 수 있는 것과 같이 자세한 유동장 해석에 유리하다. 따라서 BEMT를 이용한 설계 후에 설계의

검증 및 세부 유동장 분석을 통한 형상 개선에 CFD를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부, 에너지관리공단 지원으로 수행중인 3MW급 해상풍력발전 시스템 개발의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.