

## 풍력단지 건설에 따른 수평축 풍력터빈 후류 영향에 대한 CFD연구

이 세욱<sup>1)</sup>, 조 진수<sup>2)</sup>, 신 형기<sup>3)</sup>, 경 남호<sup>4)</sup>

### A CFD Study on the Wake Effect of HAWT for Construction of Wind Farm

Taejin Kang, Seawook Lee, Leesang Cho, hyeongkee Shin, Namho Gyeong

Key words : HAWT(수평축 풍력터빈), FLUENT(플루언트)

**Abstract** : Recently the wind farm is constructed all over the world according to the lack of the resources. The spacing between front and rear wind turbines to construct the wind farm. The wake of front wind turbine has a bad effect on the performance of the rear wind turbine. A basic CFD study on the wake effect of HAWT for construction of wind farm was done by the FLUENT. This study shows the wake of front wind turbine and the results of this study will be used to calculate the spacing between front and rear wind turbines

#### Nomenclature

$\vec{r}$	: position vector
$\vec{v}$	: absolute speed, m/s
$\vec{v}_r$	: relative speed, m/s
$\rho$	: density, kg/m <sup>3</sup>
$\vec{\Omega}$	: angular velocity, rad/s
$q$	: conservation variable
$E, F, G$	: flux vector
$S$	: source term

#### 1. 서론

20세기 후반에 접어들면서 화석에너지원의 유한성과 환경오염에 관한 문제들로 인해 지속 가능하며, 청정한 신 재생에너지 자원에 관한 개발 필요성이 요구되었다. 국내의 경우 세계 4위의 석유 수입국으로 화석에너지의 고갈, 석유 가격 상승, 환경오염 등의 문제가 발생함에 따라 화석 연료를 대체할 수 있는 신재생에너지에 관심을 갖기 시작했다. 이러한 추세 속에 풍력에너지나 태양에너지와 같은 무공해 대체 에너지의 활용 연구가 21세기 대체 에너지 개발의 주체가 되어 빠르게 진행되고 있다<sup>1)</sup>.

풍력발전은 산악지형이나 해안가에서의 강한 바람을 통해 전기를 발생시키며, 주위 환경에 미치는 영향이 적어 새로운 대체 에너지로 세계적인 주목을 받고 있다<sup>2)</sup>.

미 항공우주국(NASA)에서 개발된 100kW급 풍력발전 시스템을 시작으로 현재 전 세계 풍력터빈 설치용량은 2003년 기준으로 약 40GW에 달하고 있다. 또한 해상풍력발전에 대한 관심의 증가로 인해, 관련 연구들의 급격한 증가에 힘입어 2003년말 기준으로, 전 세계적으로 설치된 해상 풍력발전 설치용량은 0.6GW에 이르고 있다. 특히, 유럽지역은 2010년까지 해상풍력발전 총 설치용량 10GW를 예상하고 있다.

국내의 경우, 제주도를 비롯한 일부 지방자치단체가 해외의 풍력터빈을 도입하여 시험운영하고 있다<sup>3)</sup>. 또한 정부도 청정에너지에 대한 높은 관심을 가지고 풍력에너지를 포함한 여러 가지 재생에너지에 대한 지원을 하고 있다<sup>4)</sup>.

- 
- 1) 한양대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : mplsw@hanyang.ac.kr  
Tel : (02)2220-1716 Fax : (02)2294-0547
  - 2) 교수, 한양대학교 기계공과부  
E-mail : jscho@hanyang.ac.kr  
Tel : (02)2220-0429 Fax : (02)2281-4016
  - 3), 4) 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단  
E-mail : hkewind@kier.re.kr  
Tel : (042)860-3748 Fax : (042)860-3543

보통 풍력터빈 로터를 통과하는 기류의 풍속은 최대 약 40% 까지 감소된다고 알려져 있으며, 후류에서의 난류강도가 크게 증가한다. 풍력터빈 발전단지의 건설 시 두 대의 풍력터빈이 연속적으로 배열되어 있는 경우, 전방에 설치된 풍력터빈의 후류에 의한 영향으로 후방의 풍력터빈의 경우 일반적으로 약 10-20%의 출력감소가 유발되며, 최악의 경우 최대 약 60%까지 출력저하가 발생하기도 한다. 따라서 대규모 해상풍력발전 단지 건설에 있어 풍력터빈의 설치 간격, 방향 등의 신중한 결정은 에너지 생산 효율의 극대화를 위해 필수적인 요소이다<sup>(5)</sup>. 또한 풍력터빈에서 에너지 추출 후 로터 바로 후방에서 측정된 풍속은 로터면으로 접근해오는 풍속에 비해 급격히 저하되며, 허브 높이 근방에서 기류의 난류성분은 크게 나타나고, 후방으로 빠져나가는 흐름은 로터의 회전에 의한 영향으로 wind wake를 발생하게 된다.

풍력터빈의 후류 특성은 풍력발전단지를 조성할 때 풍력터빈의 간격을 결정하는데 중요한 조건이다. 따라서 전방 풍력터빈의 후류를 예측하여 전방 풍력터빈 후류의 영향을 받지 않는 거리를 확보하여 풍력발전 단지를 건설해야 한다. 풍력발전단지를 조성할 때 풍력터빈에 의한 소음, 설치면적의 제한, 균일한 풍향 자원 분포 등과 같은 육상 풍력발전단지 건설의 제한요소 문제로 인해 점차 해상풍력발전 단지 조성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 실제 다수의 유럽국가 중심으로 대형 해상풍력발전 단지가 건설되어 운전 중에 있다. 해상풍력발전단지의 경우 건설비용 및 관리 비용 등의 문제로 인해 설치되는 풍력터빈 간의 간격이 최소화 될 필요가 있다.

본 연구에서는 전방 풍력터빈의 후류가 후방 풍력터빈에 미치는 영향을 CFD를 해석을 통해 분석하여 해상풍력발전단지의 건설 시 풍력터빈의 성능을 극대화 할 수 있는 풍력터빈간의 간격을 결정하기 위한 기초연구를 수행하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 수치해석기법

풍력터빈 블레이드의 전산해석 방법으로는 FLUENT를 사용한다. Fluent는 비압축성 압축성 3차원 유동의 수치해석을 위해 개발된 프로그램으로 전처리 장치인 GAMBIT과 solver 및 후처리장치인 FLUENT로 구성되어 있다.

FLUENT는 회전좌표계 문제를 풀 때 속도변수로써 상대속도( $\vec{v}$ ) 또는 절대속도( $\vec{v}$ )의 사용이 가능하다. 두 속도의 관계식은 다음과 같다.

$$\vec{v}_r = \vec{v} - (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \quad (1)$$

여기서,  $\vec{\Omega}$ 는 각속도벡터(회전좌표계의 각속도)이고,  $\vec{r}$ 은 회전좌표계의 위치벡터이다.

관성좌표계에 대한 운동량 방정식항 중에서 운동량의 변화율을 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) \quad (2)$$

회전좌표계에서 절대속도 항은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}) + \rho(\vec{\Omega} \times \vec{v}) \quad (3)$$

이고, 상대속도 항은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}_r) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}_r) + \rho(2\vec{\Omega} \times \vec{v}_r + \vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}) + \rho \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} \times \vec{r} \quad (4)$$

여기서  $\rho(\vec{\Omega} \times \vec{v})$ 는 코리올리힘이다. FLUENT에서는  $\rho \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} \times \vec{r}$ 항을 무시하기 때문에 Relative velocity formulation을 사용하여 시간에 따른 각속도 변화 모델은 사용하는 것이 적절하지 않다.

지배방정식인 소스항을 포함한 압축성 레이놀즈-평균 Navier-Stokes 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rF)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta} + \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{1}{r} S \quad (5)$$

여기서 q는 Conservation variable, E,F,G는 flux vector이고 S는 source term이다.

### 2.2 경계조건 및 계산조건

본 연구에서는 비압축성으로 가정할 수 있으므로 Segregated Solver를 사용하였다. 경계조건은 블레이드 표면을 wall로, 입구 경계 조건으로써 균일 속도유입조건(velocity inlet)을, 출구 경계조건으로 정의된 부분에 대기압력 조건(pressure outlet)을 사용하였다. 난류 모델은 Spalart-Allmaras 모델을 사용하였다.

Computational domain은 원통 형상을 사용하였으며, 블레이드 전방으로 블레이드 지름의 5배, 블레이드 후방으로 10배의 거리를 computational domain의 크기로 결정하였다. 또한 computational domain의 지름은 로터 직경의 5배로 결정하였다<sup>(6)</sup>.

모델링에 사용된 전체 격자는 약 200만개가 사용되었고 그 중 블레이드 주변의 격자는 35만개로 이루어졌다. 정렬 격자의 사용을 용이하게 하기 위해서 블레이드의 단면 형상을 추출하여 블레이드를 둘러싸는 형상의 부피를 생성하였다.

본 연구에서는 한국에너지기술연구원에서 제공한 NREL<sup>(6)</sup> 풍력터빈 블레이드의 형상을 이용하여 수치해석을 수행하였기 때문에 NREL 풍력터빈 블레이드의 작동영역을 그대로 사용하여, 유입 풍속을 6m/s로 하고, 로터 블레이드의 회전속도를 71.63rpm으로 하여 계산을 수행하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 풍력터빈 형상

Fig. 1은 수평축 풍력터빈 후류 영향을 계산하기 위해 본 연구에서 사용된 NREL 풍력터빈 블레

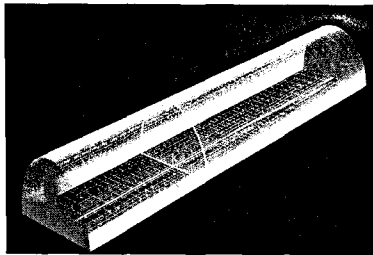
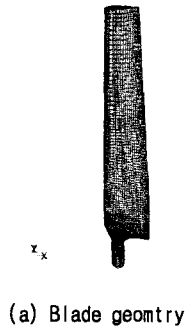


Fig. 1 Geometry of wind turbine blade and computational domain

이들의 형상과 computational domain을 나타낸 것이다. 블레이드의 개수는 2개 이고 로터의 직경은 11.064m 이다. 블레이드의 단면 에어포일 형상은 NREL S809에어포일이 사용되었다.

### 3.2 풍력터빈 후류해석 결과

Fig. 2는 FLUENT를 이용해 NREL 풍력터빈 블레이드의 후류 영향을 계산한 결과의 수렴성을 나타낸 것이다.

Fig. 3은 NREL 풍력 터빈 블레이드 면에서의 path line을 나타낸 것이다. 블레이드의 윗면에서의 속도성분이 뒷면에서의 속도성분에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3(a)에서 블레이드 허브 부분에서 팁 부분으로 갈수록 속도가 증가하는 것을 알 수 있고 이는 팁 부분으로 갈수록 회전속도 성분이 증가하기 때문이다. 또한 블레이드 뒷면에서의 속도 성분은 허브 부분에서 팁 부분으로 블레이드 면을 따라 이동하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 NREL 풍력터빈 블레이드 전방과 후방의 속도분포를 나타낸 것이다. 전체적인 속도의 크기는 블레이드의 뒷 부분에서 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 블레이드의 팁 속도의 영향에 의한 것이다. 그러나 블레이드의 후방에서는 블레이드에 의해 감소된 속도성분이 나타나는 것을 볼 수 있다. computational domain의 블레이드 후방으로의 길이가 로터 직경의 10배 이므로 블레이드 후방으로 10배의 거리까지 전방 블레이드의 후류가 영향을 미치고 있다는 것을 확인할 수 있다.

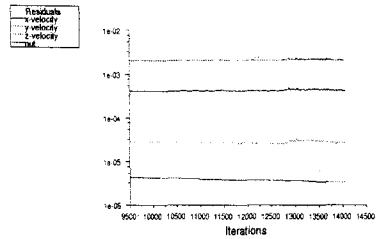


Fig. 2 Scaled residuals window

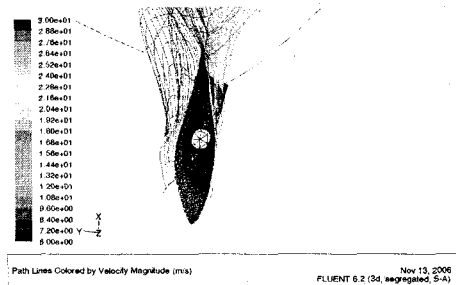
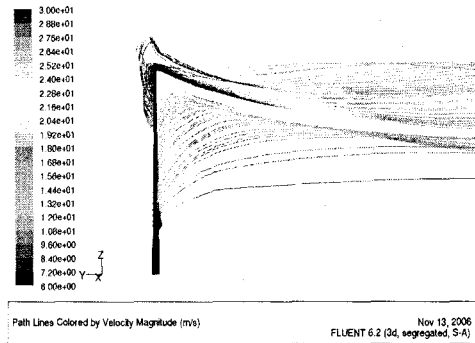


Fig. 3 Path line of the upper and lower surface of NREL wind turbine blades

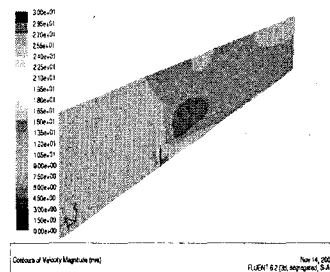


Fig. 4 Contour of velocity magnitude of NREL wind turbine blade

#### 4. 결론

본 연구에서는 풍력단지 건설에 따른 수평축 풍력터빈의 후류 영향에 대한 CFD 연구를 수행하였다.

1. FLUENT를 이용한 NREL 풍력터빈 블레이드 상의 path line을 통해 블레이드 허브 부분에 비해 팁 부분에서 속도가 빨라지고 그에 따른 후류의 급격한 변화가 나타나는 것을 확인하였다.
2. FLUENT를 이용한 path line을 통해 블레이드의 뒷부분에서는 블레이드 면을 따라 허브 부분에서 팁 부분으로 이동하여 팁 부분에서 path line이 조밀하게 나타난다. 이는 블레이드의 팁 부분에서는 급격한 유동변화가 나타나는 것을 확인하였다. 그 영향은 이후 수행될 두 풍력터빈간의 배치 간격에 중요한 요소이다.
3. FLUENT 해석을 통해 확인한 결과 팁 부분을 지나면서 후류의 급격한 유동 현상이 지속되지 못하고 원래 유동으로 회복되는 것을 확인할 수 있다.
4. FLUENT 해석을 통해 블레이드 후류의 영향이 로터 길이의 10배 후방 지점에서 속도에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

#### 후기

본 연구는 2005년도 한국에너지기술연구소 “해상풍력 발전성능에 미치는 후류영향에 대한 CFD 연구” 과제의 지원에 의해 수행된 연구결과물의 일부이며 지원에 감사드립니다.

#### References

- [1] 최재승, 김규홍, 이경태, 2002, “한국형 풍력터빈의 요구조건 검토”, 한국항공우주학회지, 제30권, 1호, pp. 165 ~ 172.
- [2] 문영석, 조경엽, 2003, “불완전 경쟁시장하의 대체에너지 기술개발과 기후변화협약”, 에너지경제연구원, pp. 24.
- [3] 김건훈, 2004, “풍력발전기술의 국내외 현황과 전망”, 한국태양에너지학회지, 제 3권 제 3호, pp. 32 ~ 43.
- [4] 신성철, 2005, “에너지기술개발 동향 및 우리나라 전략”, 과학기술정책지, 제 15권 제 4호, pp. 18.
- [5] Hand, M. M., Simms, D. A., Fingersh, L. J., Jager, D. W., Cotrell, J. R., Schreck, S., and Larwood, S. M., 2001, “Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind

Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns,” National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, Dec..

- [6] Mandas, N, Carcangiu, C.E., and Cambuli F., 2005, “The Economy of Large Scale Wind Turbines,” Fluent News Summer 2005,

- [7] <http://www.nrel.gov/>