

포텐셜 유동을 기반으로 한 풍력 터빈 블레이드의 공력 해석 및 후류 예측 기법에 관한 연구

김 호건¹⁾, 신 형기²⁾, 이 수갑³⁾

Potential Based Prediction Methods of Aerodynamic and Wake Simulation of Wind Turbine Blade

Hogeon Kim, Hyunki Shin, Soogab Lee

Key words : VLM, CVC, FVE model, Vortex Filament, Vortex Ring

Abstract : This paper describes the prediction of aerodynamic performance and wake of HAWT in normal and yawed flow operation using potential based methods. In order to analyze aerodynamic performance of wind turbine WINFAS program is used, which is based on VLM(Vortex Lattice Method) and CVC(Constant vorticity contour) Free wake model. Some problems of CVC vortex filament method are investigated and to improve these problems vortex ring wake are introduced in behalf of CVC vortex filament. The prediction results using the vortex lattice wake are compared to experimental data.

Nomenclature

U_∞ : wind speed, m/s
 ϕ^* : velocity potential
 N_f : number of vortex filament
 Γ : circulation, m^2/s
 Γ_V : vortex circulation, m^2/s
 TSR: tip speed ratio, $\frac{R\Omega}{U_\infty}$
 r_c : vortex core radius, m
 r_{c0} : initial vortex core radius, m
 c: chord length, m
 a_1 : Squire's parameter
 α : Oseen parameter, 1.25643
 Re_V : vortex reynolds number, Γ_V/ν
 ν : kinematic viscosity, m^2/s
 Ω : rotational frequency, rad/s
 ρ : density, kg/m^3
 ζ : wake age, deg
 δ : eddy viscosity coefficient

subscrip

VLM : vortex lattice method
 CVC : constant vorticity contour

1. 서론

현재 신재생 에너지원 중에서 기술 성숙도와 경제성이 우수한 풍력 에너지는 20세기 중후반부터 환경과 에너지에 관한 관심이 증가하면서 급속하게 성장하기 시작하였다. 하지만 아직까지 화석 에너지와 원자력 에너지 비해 경제성은 뒤쳐져 있는 게 사실이다. 그리고 풍력 에너지의 성장에 큰 기여를 하였던 각국의 정책 지원이 줄어들고 있으며 CO₂를 발생하지 않는 무공해 에너지원으로서 환영받아 오다가 최근 소음·진동 발생과 조망권 침해, 풍력 단지 구성에 따른 환경에 미치는 영향 등이 풍력 발전의 성장을 저해하는 요인으로 작용하고 있다. 이러한 풍력 발전의 저해 요인을 감소 시키기 위해 많은 연구가 진행되

-
- 1) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
E-mail : hamanial@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7384 Fax : (02)875-4360
 - 2) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
현재) 한국 에너지 기술 연구원
E-mail : hkeewind@kier.re.kr
Tel : (042)860-3748 Fax : (042)861-6224
 - 3) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 교수
E-mail : solee@plaza.snu.ac.kr
Tel : 02)880-7384 Fax : (02)875-4360

어 오고 있다. 풍력 기술의 선진국인 유럽의 독일, 덴마크, 네덜란드등에서는 저소음 블레이드 개발을 위해 프로젝트를 진행중에 있으며, 해상 풍력 단지의 건설 및 운용이 환경에 미치는 영향에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 기존의 화석연료와 원자력에 비해서 낮은 수준의 경제성을 높이기 위한 연구도 수행되고 있다.

풍력 터빈의 경제성 향상을 위해 터빈의 용량은 계속 증가하고 있다. 건설 비용 및 풍력 단지 조성 비용 감소와 터빈 효율의 증가로 인해 풍력 발전 시스템 생산 회사에서는 대용량의 풍력 터빈 개발에 박차를 가하고 있다. 풍력 블레이드의 길이도 터빈의 용량 증가에 맞추어 증가하고 있는 추세로 1960년대에 24m이었던 블레이드 길이는 2005년 126m로 무려 5배~6배 증가하였다⁽¹⁾. 또한 수명 향상과 재료적 특성 때문에 탄소섬유를 이용한 블레이드 개발이 진행되고 있다. 하지만 가격이 다른 재료에 비해 비싸기 때문에 단순히 재료뿐만 아니라 다분야에 걸친 최적화 과정(MDO, Multidisciplinary Design Optimization)⁽²⁾을 통한 블레이드의 비용 저감이 필요하다.

이러한 다분야 최적화 과정을 이루기 위해서는 각 분야의 신뢰성을 갖춘 해석 기술이 필요하게 된다. 그중 블레이드의 공력 해석은 헬리콥터나 가스 터빈등과 같은 터보 기계와는 다르게 풍속과 풍향이 항상 변하는 즉 비정상 상태에서 운용되는 블레이드를 해석해야 하는 어려움이 있다. 또한 수명 향상을 위해 탄소 섬유가 사용되고 대용량 터빈 개발에 따른 블레이드 길이가 증가함에 따라 점차 유연해 지고 있으며 이에 따라 windshear, 요 에러, 동적 실속, 난류 유동, 블레이드-타워 상호작용 등 비정상 공력 하중에 의한 안정성 문제와, 블레이드가 타워에 부딪히는 등의 문제가 발생할 수 있다. 이러한 비정상 공력에 대한 안정성 과 피로하중 및 블레이드 변형등의 해석을 위해서는 풍력 블레이드의 비정상 공력에 대한 적절한 공력 하중 해석이 필요하다. 이에 비정상 공력 해석에 대한 이해도를 높이고 비정상 공력 해석 기법의 적절성을 알아 보기 위한 NREL의 Blind Test⁽³⁾와 IEA Annex⁽⁴⁾등이 유럽과 미국 등에서 수행되었다. NREL Phase VI 로터 실험은 NASA Ames 연구 센터에서 수행되었고 실험 조건에 따른 참가자들이 각자의 해석툴을 이용해 해석 결과가 비교 분석되었다. 결과에 의하면 고품속 영역에서 실속 지연 효과를 고려하지 못하여 대부분의 수치 해석 결과가 부정확했으며 요 에러가 큰 조건에서도 부정확한 결과를 보였다. 이에 고품속 영역에서 실속지연에 관한 모델링 연구와 요 에러 상황에서의 적절한 수치해석기법 개발⁽⁵⁾에 관한 연구가 활발히 수행되고 있는 상황이다.

풍력 블레이드의 공력 해석기법으로는 크게 깃요소 운동량이론(BEMT, Blade Element Momentum Theory)와 비점성 비압축성 유체로 가정한 포텐셜 유동을 해석하는 패널법(Panel Method)과 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석할 수 있는 CFD가 있다. BEMT 기법은 2차원 이론이기 때문에 후류에 의한 영향과 끝단의 영향, 동적실속, 3차원 실속 지연 등을 고려하기 위해 여러 모델링을 사용하게 된다. 일차적인 터빈 하중과 성능 예측으로는 적합하고 블레이드의 기본적인 디자인 파라미터들에 대한 직관력을 제공해 줄 수 있고 계산 시간이 빠르기 때문에 풍력 터빈의 블레이드 설계에 널리 사용되고 있다.⁽⁶⁾ 하지만 요 에러 상황에서는 터빈의 공기역학적 거동을 제대로 설명해 주지 못하고 있다.⁽⁷⁾ CFD를 이용한 해석 결과는 풍력 터빈 블레이드의 유동장에 대한 일관되고 물리적으로 적합한 해석 결과를 보여주지만 막대한 계산비용으로 블레이드 설계에는 사용되고 있지 않다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 특히 동적실속과 유동의 박리 문제와 수치적 소산으로 인해 vortical wake가 적절히 묘사되지 않는 문제점이 있다. 컴퓨터 성능이 더 향상되면 최종적으로는 CFD를 이용한 풍력 블레이드의 공력 설계가 가능하게 될 것이다. CFD와 BEMT의 중간단계로 패널법이 있는데 이 방법은 후류를 와동으로 묘사(vortex wake)할 수 있기 때문에 요 에러 상황등에서 발생되는 비정상 유동문제에 대해 BEMT기법에서 사용하는 동적 유입 모델과 skewed wake를 동시에 다룰 수 있으며 해석이 어려운 비선형 비정상 공기 역학 문제나 블레이드 실속 문제를 반 실험적(semi-empirical) 모델링과 함께 사용하여 해석할 수 있다. 현재 가장 확실한 신뢰도를 가지면서 실용적인 계산 시간과 범용성을 가지는 패널법이 앞으로 BEMT를 대신한 풍력 터빈 블레이드 설계 툴로 자리 잡을 것으로 예상된다.

본 논문에서는 타워와 후류의 상호작용을 묘사할 수 있는 CVC(Constant Vorticity Contour)⁽¹⁰⁾와 FVE(Finite Vortex Element)자유 후류 모델⁽¹¹⁾을 이용한 패널법에 대하여 기술하였으며 이 방법의 적용이 까다로운 블레이드 위의 순환분포에 대하여 논하고, CVC와 FVE 모델의 개선을 위해 블레이드와 후류를 와류 격자로 모델링한 비정상 패널법의 적용과 이 방법을 이용한 공력 하중 해석을 기술하였다.

2. 지배 방정식 및 수치 해석 기법

2.1 비정상 와류 격자 패널 기법(Unsteady Vortex Lattice Method)

서울대학교 공력소음 연구실에서 개발한 풍력 터빈의 공력 해석 및 후류 예측 프로그램인 WINFAS는 비압축성, 포텐셜 유동을 바탕으로 하고 있다. 비압축성 포텐셜 유동의 지배 방정식은 아래와 같은 라플라스 방정식이다.

$$\nabla^2 \phi^* = 0 \quad (1)$$

식(1)은 벡터 항등식을 이용하여 비점성, 비회전을 가정하게 되면 Biot-Savart 법칙이 얻어지는데 이 식을 통해 유동장의 속도를 계산할 수 있다.

$$\bar{u}(\bar{y}) = \frac{1}{4\pi} \int_c \frac{\bar{y} - \bar{x}}{|\bar{y} - \bar{x}|^3} \times \bar{\Gamma} dl \quad (2)$$

\bar{x} 는 와동의 위치 벡터이고 \bar{y} 는 와동에 의해 속도가 유도되는 위치이다. 본 연구에서는 직선 와류 요소로부터 유도되는 속도를 구하기 위해 Scully Vortex⁽¹²⁾ 모델을 이용하였다.

블레이드나 타워 등 고체 표면은 와류 고리(vortex ring)를 사용하여 모사하였다. 블레이드나 타워 등 고체 표면에서의 와류 격자의 순환의 크기는 비침투 조건으로부터 구할 수 있다.

$$\bar{N} \cdot \bar{u} = 0 \quad (3)$$

$$\left(\sum_{k=1}^B \sum_{i=1}^N \alpha'_{i,k} \Gamma_{i,n,k} + \sum_{t=1}^T a_t'' \Gamma_{i,n} + \text{wind} + (\bar{w}_j)_{\text{wake}} \right) \cdot \bar{N} = 0 \quad (4)$$

식(3)은 고체 표면에서의 비침투 조건을 나타내며 식(4)는 고체 표면을 격자로 나누었을 때 n 번째 시간에서 특정 고체 표면위에서 j 번째 패널에서의 비침투 조건식이다. B는 블레이드 개수, N은 블레이드 패널 수, T는 타워의 패널수 이다.

$\alpha'_{i,k}$ 는 k번째 블레이드의 i번째 패널에 의한 j번째 패널에 미치는 영향 계수이다. a_t'' 는 t번째 타워의 패널에서 j번째 블레이드 패널에 미치는 영향 계수이다. $(\bar{w}_j)_{\text{wake}}$ 는 n-1번째 시간의 후류에 의한 속도이다. \bar{N} 은 패널의 수직방향 벡터를 의미한다.

$$\bar{F}_{i,j} = \sum_{k=1}^4 \rho v_k \times \bar{dl}_k \Gamma_{i,j} + \rho \left(\frac{d\Gamma_{i,j}}{dt} \Delta S_{i,j} \right) \bar{n}_{i,j} \quad (5)$$

공력 하중은 비정상 Kutta-Joukowski 이론을 통해 구하게 되는데 블레이드의 i(radial wise), j번째(chord wise) 와류 격자에 작용하는 힘은 식(5)로 구할 수 있으며 이때 v_k 는 와류선 중심에서의 전체 속도이며 $\Delta S_{i,j}$ 는 패널의 면적이다. $\bar{n}_{i,j}$ 은 와류 격자에 수직한 방향 벡터이다. 위 식의 우변의 두 번째 항은 비정상 조건에 의해 발생하는 부가 질량 항이 된다. 비정상 Kutta-Joukowski 이론으로 해석할 수 없는 형상

항력의 경우는 비정상 패널법을 통해 구해지는 유효받음각을 이용해 2차원 에어포일 데이터를 이용하여 보정하게 된다. 유효받음각이 실속 받음각보다 커지게 되면 Du & Selig⁽¹³⁾ 3D stall delay 모델이 적용된 2-D 에어포일 데이터값을 바탕으로 하중을 계산하게 된다.

2.2 후류 모델링 - CVC 유한 와류 요소 모델

CVC⁽¹⁰⁾(Constant Vorticity Contour)유한 와류 요소(FVE, Finite Vortex Element)⁽¹¹⁾로 후류를 모사하는 방법은 강도가 일정한 직선 와류 요소를 뒷전 패널의 순환 분포 맞춰 뒷전에 연결시켜 Kutta 조건을 만족시키는 방법이다. 후류의 와류선 강도와 release point는 다음의 식으로 결정된다.

$$\Gamma = \frac{1.2 \max(\Gamma(r, \psi))}{N_f} \quad (6)$$

$$\bar{r} = \frac{1}{\Gamma(r_b) - \Gamma(r_a)} \int_{r_a}^{r_b} \frac{d\Gamma}{dr} dr = \frac{(r_b - r_a)}{2} \quad (7)$$

$$\Gamma(\bar{r}) = \frac{\Gamma(r_a) + \Gamma(r_b)}{2} \quad (8)$$

N_f 는 와류선의 개수를 나타내며 20% 여유를 줌으로서 순환이 커질 경우를 고려하게 된다. 구간(r_a, r_b)에서의 와류선 강도는 $\Gamma(\bar{r})$ 이고 \bar{r} 인 지점에 하나의 와류선이 나오게 된다. 후류는 공력학적 힘을 가지지 않고 주변의 유동 속도로 이동하게 되는 자유 후류로 모델링 하였다.

2.3 후류 모델링 - 와류 고리 모델

위에서 언급한 CVC 유한 와류 요소법은 뒷전 격자의 bound circulation 값에 따라 release point와 등 와류의 강도가 식(6),(7),(8)에 의해 결정된다. Fig. 1(a)와 같이 일정한 구간의 와류 시트를(Vortex Sheet) 하나의 등 와류선으로 대체하는 것이 등와류 선도 모델의 핵심이 된다.

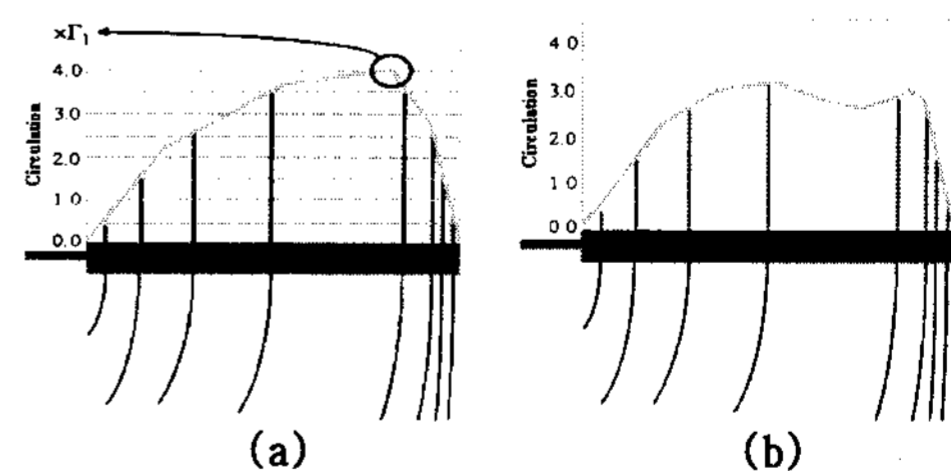


Fig. 1 CVC Wake release point

하지만 Fig. 1(a)와 같이 국부 최대값이 하나인 경우는 등와류 선도 모델의 적용이 용이 하지만 국부 최대값이 두 개 이상 존재하는 경우는 등와류 선도 모델의 적용이 어렵게 되고 bound circulation 값의 변화가 없는 구간을 CVC로 모델링할 경우 수치적 오차가 발생하게 된다. 수치 해석 조건은 정상상태일지라도 release point는 일정한 위치를 나타내지 못하게 된다. Fig. 3은 블레이드 중간 부분에 bound circulation 분포가

블레이드 길이 방향으로 변하지 않고 일정한 구간이(Fig. 2) 있을 때의 후류 구조를 보여 주고 있다. 중간 부분의 후류 release point가 주기적으로 변하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 문제는 특정 블레이드의 형상에 의해 발생 되는 것으로 블레이드의 코드, 비틀림, 팁과 루트부의 영향에 의해 발생되고 CVC 모델이 이러한 블레이드 위의 circulation 분포를 제대로 묘사하지 못하기 때문에 필연적으로 공력 하중 해석에 오차를 발생시키게 된다.

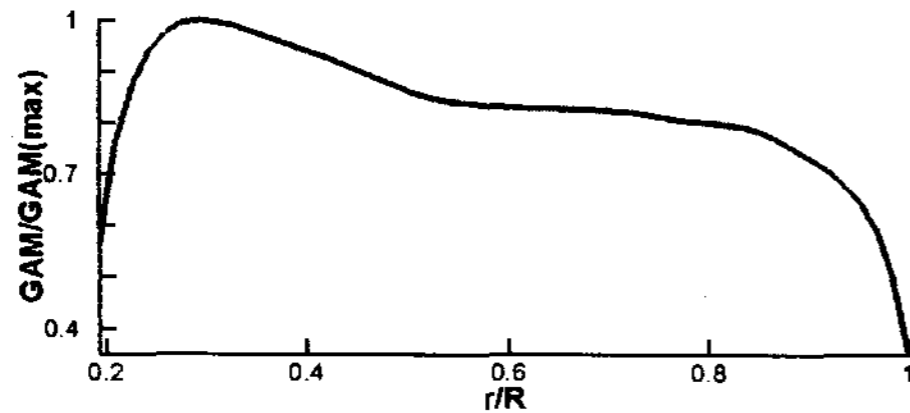


Fig. 2 Specific distribution of circulation on trailing edge lattice hard to apply CVC model

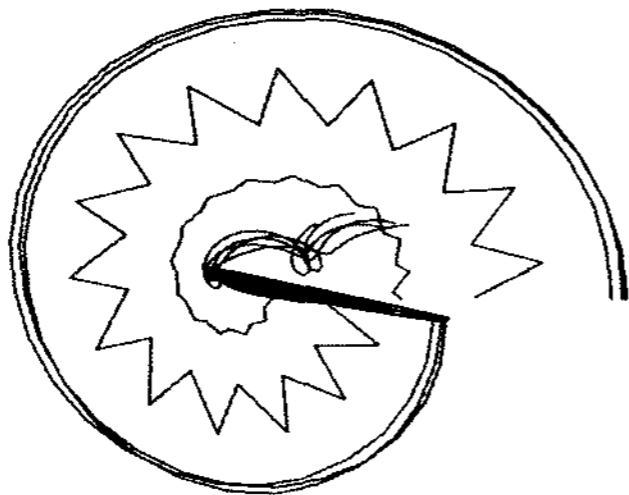


Fig. 3 CVC wake geometry of periodically changing of release point

이러한 CVC 유한 와류 요소법의 문제를 해결하기 위해 블레이드 뿐만 아니라 후류 또한 와류 고리(vortex ring)로 묘사 하였다. 후류 패널은 각각의 circulation 값을 가지는 패널이 블레이드의 뒷전으로부터 떨어져 나오게 된다. 가장 최근에 떨어져 나간 각각의 후류 패널의 circulation 값은 이전 계산 시간에 결정된 블레이드 뒷전 패널의 circulation 값이 되며(식 9), 이때 비정상 Kutta condition을 만족하게 된다. 후류는 자유 흐름속도에 따라 흐르게 되므로 공력 하중을 갖지 않는다.

$$\Gamma_{W_i} = \Gamma_{TE_{i-\Delta t}} \quad (9)$$

심한 요에러 상황과 같은 비정상 공력 상황에서 블레이드 뒷전에서의 bound circulation의 급격한 변화에 대해 filament 형태보다 유연하게 후류를 표현할 수 있다.(CVC filament의 경우 circulation 분포에 따라 filament수가 증가 또는 감소하게 된다).

와류 고리를 이용해 후류를 묘사할 경우 계산 초기에 생성된 강한 초기 와류와 근접해 있는 자유 후류사이에서 발생하는 강한 유도 속도와 강도가 센 익단 와류에 의해 발생하는 받음각의 변화등에 의해 불안정성⁽¹⁴⁾의 문제가 발생 할 수 있다. 또한 와류중심반경에 따라 후류의 불안정

성과 해의 정확도가 달라지게 된다. 이러한 후류의 불안정성을 해결하고 해의 정확도를 높이기 위해 회전익기 특히 헬리콥터분야에서는 초기 와류를 줄이기 위해 slow starting하는 방법과 내부와류와 초기와류의 와류 중심 반경을 매우 빨리 증가시키는 방법⁽¹⁵⁾과 Leishman 등이⁽¹⁶⁾ 제안한 와류의 점성에 의한 확산효과를 주는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 안정적이고 정확한 해를 구하기 위해 1회전까지 slow starting과 익단부근의 초기 와류 중심 반경을 크게 주는 방법을 사용하였으며 또한 와류의 점성에 의한 확산 효과를 주기 위해 Squire의 vortex core growth 모델⁽¹⁷⁾을 사용하였다.(식 10)

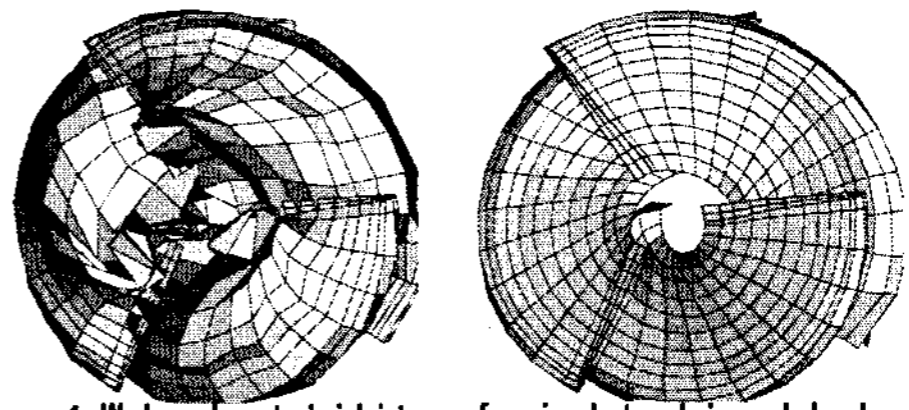


Fig. 4 Wake Instability of wind turbine blade

$$r_{c(\zeta)} = \sqrt{r_{c0}^2 + 4\alpha\delta\nu\zeta/\Omega} \quad (10)$$

여기서 r_{c0} 는 초기 와류 중심 반경이고 α 는 Oseen 상수이고 δ 는 eddy 점성 계수이다.

$$\delta = 1 + a_1 Re_v \quad (11)$$

a_1 은 실험으로부터 결정되는 값으로서 0.0002에서부터 0.2의 값이 될 수 있으며 a_1 을 결정하기 위해서 서울대학교 공력소음 연구실의 풍동실험결과⁽¹⁸⁾를 분석하였다. 0일 때는 층류 와류를 나타내며 a_1 의 값이 클수록 난류의 영향이 크다. Fig.5 에서 보듯이 풍동실험 결과로부터 0.0002가 실험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 실제 크기의 풍력 발전기의 경우는 자유 흐름에 난류성분이 강하기 때문에 와류가 쉽게 소산되고 와류 중심 반경도 빠르게 커지게 되므로 a_1 은 0.0002보다 큰 값이 되어야 한다.

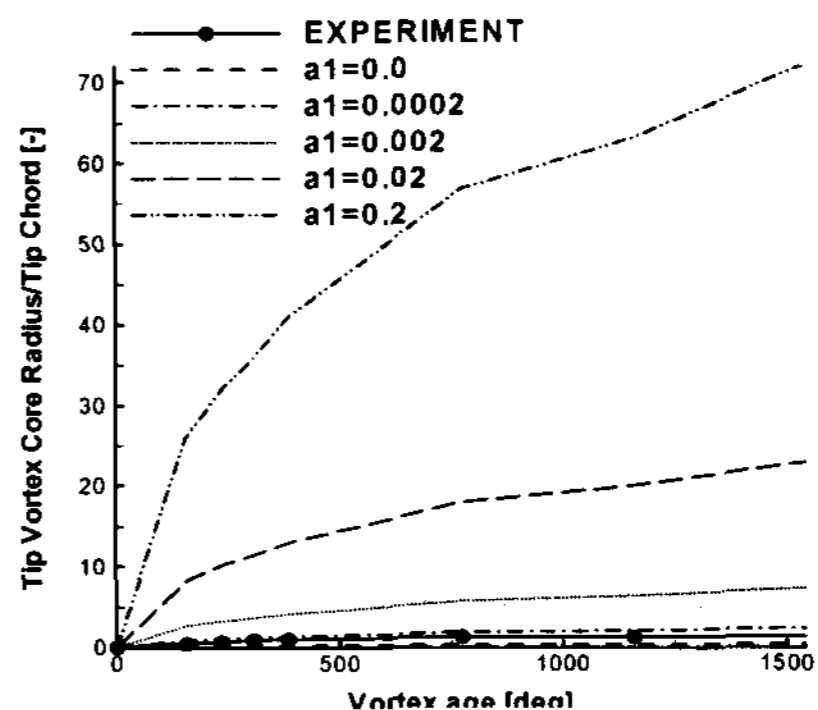


Fig. 5 Vortex core growth corresponding to different values of the Squire's eddy viscosity parameter, a_1 , compared with experimental results from ref(18,19)

3. 해석 결과

CVC 유한 와류 요소 모델을 대체한 와류 격자 자유 후류법의 타당성을 검토하기 위해 공군 사관학교에서 수행된 풍동 실험 결과중⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ 요에러 발생시의 측정된 결과와 비교하였다.

Fig. 6은 와류 격자로 모델링된 후류의 구조를 보여 주고 있다. Fig. 7, Fig.8은 CVC 유한 와류 요소 모델을 이용한 값과⁽¹⁹⁾ 후류를 와류 격자로 모델링한 결과값을 보여 주고 있다. CVC 유한 와류 요소 모델을 이용하여 타위를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 차이는 요각이 증가함에 따라 점점 작아지며 요각이 30도 일 경우 타위를 고려한 것과 고려하지 않은 것의 차이가 별로 없음을 알 수 있다. 이에 비해 와류 격자 후류 모델의 경우는 요각이 0도 일때 타위의 영향이 커지지만 이에 대한 영향을 고려할 수 없기 때문에 타위를 고려한 CVC 유한 와류 요소 모델보다 약간 큰 값이 나왔지만 타위의 영향이 줄어드는 높은 요각 조건⁽²⁰⁾에서는 오히려 타위를 고려한 CVC 유한 와류 요소 모델보다 실험결과에 가까워짐을 확인할 수 있다.

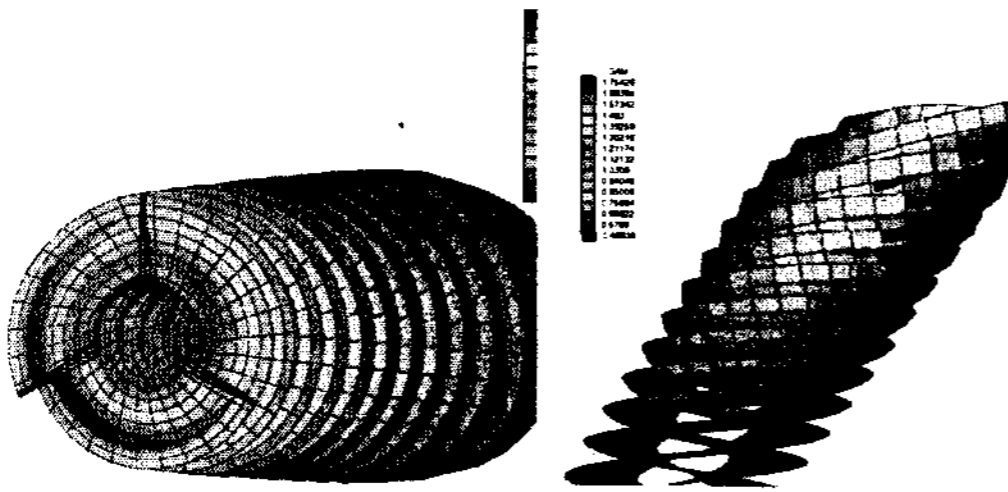


Fig.6 Wake geometry of vortex ring model, front view(left), top view(right)
($U_{\infty}=15\text{m/s}$, yaw= 30° , rpm=1500)

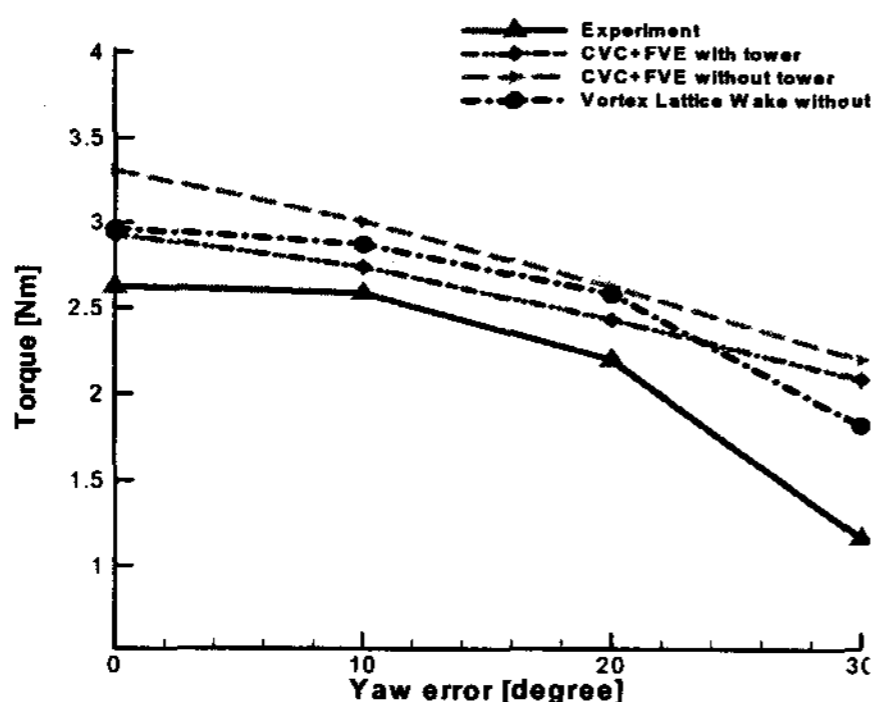


Fig.7 Torque comparison of various yawed flow condition ($U_{\infty}=13\text{m/s}$, rpm=1300)

이것은 CVC 유한 와류 요소 모델은 뒷전 패널의 순환 분포에 따라 release point와 filament 수로서 비정상 후류 모사하는 반면 와류 격자를 이용해 후류를 모사하는 경우는 뒷전 패널의 순환 분포를 그대로 후류 패널이 가지게 되므로 비정상 후류를 잘 모사하기 때문이다.

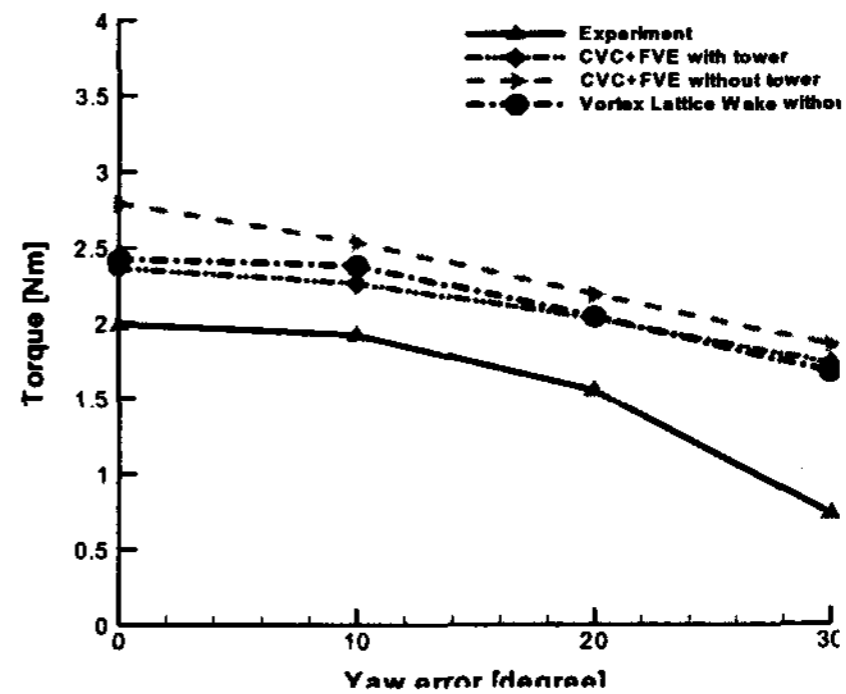


Fig.8 Torque comparison of various yawed flow condition ($U_{\infty}=14\text{m/s}$, rpm=1400)

와류 격자 모델에 타위의 영향을 고려하여 계산한다면 좀 더 정확한 해를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 요에러 30도일 때 실험값과 여러 수치 해석 결과가 많은 차이가 보이는데 이는 방위각 90도와 270도 부근에서 유동이 블레이드의 스패 방향으로 흐르게 되어 더 이상 2-D 에어포일 공력 데이터 적용에 의한 보정이 유효하지 않게 되기 때문으로 판단된다.⁽¹⁹⁾(신형기, 2005)

4. 결론

본 연구에서는 풍력 블레이드의 공력 및 후류 예측을 위해 CVC와 FVE를 바탕으로 한 VLM (Vortex Lattice Method)의 적용이 어려운 블레이드 뒷전 패널의 순환 분포에 알아보았으며 이런 어려움을 개선하기 위해 와류 격자 후류를 이용하여 풍력 블레이드의 후류를 모델링하였고 후류의 불안정성은 slow starting 방법과 내부 와류 중심 반경을 크게 하고 Squire의 vortex core growth 모델을 적용하여 해결 하였다.

방법의 타당성을 검증하기 위하여 공사 풍동 실험결과와⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ 비교하여 후류 모델링의 타당성을 확보 하였다. 앞으로의 연구에 있어서 본 모델을 이용하여 여러 비정상 공력 하중해석을 수행할 계획이며 후류가 타워, 나셀과 같은 구조물을 만나게 되는 현상을 고려하기 위한 모델링 연구가 진행될 것이다.

후기

본 연구는 산업자원부의 출연금으로 수행한 최우수 실험실사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Europe Wind Energy Association, "Wind Power Fact sheets", EWEA, 2005
- [2] 이기학, 김태운, 김규홍, 이경태, 이동호, 2005, "한국형 해상 풍력 블레이드 최적 설계 알고리즘 연구", 2005년도 춘계학술대회논문집, pp. 47~50, 한국 신재생 에너지 학회

- [3] Simms D, Schreck S, Hand M, Fingersh L. "Unsteady aerodynamics experiment in the NASA-Ames wind tunnel: comparison of predictions to measurements", NREL/ TP-500-29494, 2001
- [4] J.G. Schepers, et a. "Final report of IEA Annex XVIII' Enhanced Field Rotor Aerodynamics Database". ECN-C-02- 016, June 1995
- [5] J.G. Schepers, "ANNEXLYSE: VALIDATION OF YAW MODELS, ON BASIS OF DETAILED AERODYNAMIC MEASUREMENTS ON WIND TURBINE BLADES", ECN-C--04-097, Sep 2004
- [6] Tangler JL. "The nebulous art of using wind tunnel airfoil data and blade-element momentum theory for predicting rotor performance", AIAA paper 2002-0040,2002
- [7] J.G Schepers and H. Snel (ed), "JOULE2: Dynamic Inflow: Yawed conditions and Partial Span Pitch". ECN-C-95-056, June 1995
- [8] McCroskey WJ., 1995, "Vortex wakes of rotorcraft", AIAA paper 95-0530
- [9] Landgrebe AJ. "NEW directions in rotorcraft computational aerodynamics research in the U.S.", AGARD CP-552,1994
- [10] Quackenbush, T.T., Bliss, D.B., Wachspress, D.A., and Ong, C. C., 1990, "Free-Wake Analysis of Hover Performance Using a New Influence Coefficient Method", NASA CR 4309
- [11] 신형기, 박지용, 이수갑, 김주언, 2005, "후류와 타워의 영향을 고려한 수평축 풍력 발전기 블레이드의 비정상 하중 예측을 위한 새로운 자유후류기법의 연구", 한국 신재생에너지 학회지, Vol.1, No.1, pp.54-63
- [12] Scully, M. P., "Computation of Helicopter Rotor Wake Geometry and Its Influence on Rotor Harmonic Airloads," Massachusetts Institute of Technology Report No. ASRL TR 178-1, March 1975.
- [13] Zhaohui Du and Michael S. Selig, "A 3-D Stall-Delay Model for Horizontal Axis Wind Turbine Performance Prediction", AIAA-98-002
- [14] 이재원, 이관중, 오세종, 2006.6, "비정상 Source-Doublet 패널 기법을 이용한 헬리콥터 로터 공력 해석", 한국항공우주학회지, Vol. 6, No. 6, Pages. 1-9
- [15] Quaranta, G., Bindolino, G. Masarati, P., and Mantegazza, P., "Toward a Computational Framework for Rotorcraft Multi-Physics Analysis: adding Computational Aerodynamics to Multibody Rotor Models", Proceedings of 30th European Rotorcraft Forum, Marseilles, France,
- [16] Leishman, J. G., Bhagwat, M. J., and Bagai, A., 2002, "Free-Vortex Filament Methods for the Analysis of Helicopter Rotor Wakes", Journal of Aircraft, Vol. 39, No. 5, pp. 759~775
- [17] Squir, H. B.,1965, "The Growth of a Vortex in Turbulent Flow", Aeronautical Quarterly, Vol.16, pp. 302~306
- [18] 박지용, 김호건, 신형기, 2006, "실험을 통한 풍력 발전기의 후류구조 분석", 2006년도 춘계 학술대회논문집, pp. 273~276, 한국 신재생 에너지 학회
- [19] 신형기, 2005, "수평축 풍력 발전기 블레이드의 공력 성능 및 하중과 소음예측을 위한 수치적-실험적 연구", 서울대학교, 박사학위 논문
- [20] 김호건, 신형기, 박지용, 이수갑, 2006, "Upwind형 수퍼옥 풍력 발전기의 타워 영향에 의한 블레이드 공력 성능 및 하중 변화에 대한 고찰", 2006년도 추계학술대회논문집, pp. 261~264, 한국 신재생 에너지 학회