



## Strathprints Institutional Repository

Yu, Dong Oh and Kwon, Oh Joon and Fletcher, Timothy M. and Scheurich, Frank and Brown, Richard (2010) *Prediction of unsteady blade loads of a wind turbine using RANS and vorticity transport methodologies*. In: Annual Conference of the Korea Wind Energy Association, 2010-04-07 - 2010-04-09, Seoul, Korea.

Strathprints is designed to allow users to access the research output of the University of Strathclyde. Copyright © and Moral Rights for the papers on this site are retained by the individual authors and/or other copyright owners. You may not engage in further distribution of the material for any profitmaking activities or any commercial gain. You may freely distribute both the url (<http://strathprints.strath.ac.uk/>) and the content of this paper for research or study, educational, or not-for-profit purposes without prior permission or charge.

Any correspondence concerning this service should be sent to Strathprints administrator: <mailto:strathprints@strath.ac.uk>

# RANS 및 VTM 기법을 이용한 풍력 터빈 블레이드의 비정상 공력 특성 예측

## Prediction of Unsteady Blade Loads of a Wind Turbine Using RANS and Vorticity Transport Methodologies

유 동 옥<sup>†</sup> · 권 오 준<sup>\*</sup>

Dong Ok Yu and Oh Joon Kwon

Timothy M. Fletcher<sup>\*\*</sup> · Frank Scheurich<sup>\*\*</sup> · Richard E. Brown<sup>\*\*</sup>

**Key Words** : wind turbine, RANS, Vorticity Transport Model, yaw, unsteady three-dimensional flow

### ABSTRACT

Numerical simulations of the NREL phase VI wind turbine operating in yawed conditions have been performed using two computational methods: one based on the solution of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) using unstructured overset meshes and one known as the Vorticity Transport Model (VTM) that is based on the solution of the vorticity transport equation. The effect of the hub that was present during the NREL experiments was investigated by modeling the hub in the RANS simulations. It was found that the hub influenced the loading significantly at the inboard part of the blade when the blade passed through the wake that was developed by the hub. Both the RANS and VTM codes are able to predict well the unsteady and time-averaged aerodynamic loadings on the wind turbine blades at low wind speeds. At high wind speeds, leading-edge flow separation and strong radial flow are observed on the suction surface of the blades, when the blades are at the retreating side of the rotor. Both the RANS and VTM codes provide less accurate predictions of the blade loads. However, at the advancing side of the rotor, the flow is mostly attached to the surface of the blade, and both the RANS and VTM predictions of the blade loads are in good agreement with the measured data.

### 1. 서 론

#### 기 호 설 명

$c$	시위 길이
$C_p$	압력 계수, $(P-P_\infty) / Q_{local}$
$C_n$	수직력 계수, $F_n / cQ_{local}$
$C_t$	접선력 계수, $F_t / cQ_{local}$
$Q_{local}$	국소 동압, $1/2\rho[(-V_\infty \sin\beta \cos\psi + r\Omega)^2 + (V_\infty \cos\beta)^2]$
$r$	반경 방향 위치
$V_\infty$	풍속
$\beta$	요(yaw) 각
$\rho$	밀도
$\psi$	방위각
$\Omega$	회전 속도

수평축 풍력 터빈은 로터(rotor)의 낮은 회전 속도로 인하여 블레이드의 받음각(angle of attack)이 헬리콥터 로터 블레이드의 경우에 비해 상대적으로 크다. 따라서 블레이드 표면으로부터 유동 박리가 발생할 가능성이 높으며, 유동 박리가 발생하면 블레이드의 회전으로 인한 원심력 효과로 강한 스펠(span)방향 흐름이 형성되는 등 3차원 유동 현상이 지배적으로 나타난다. 또한 실제 운용 조건에서는 대기 전단 층(atmospheric boundary layer), 로터-타워 간섭, 요 자유흐름(yawed incoming freestream)등으로 인해 로터 방위각에 따라 변화하는 비정상적 유동 현상이 항상 수반된다. 따라서 이러한 3차원 비정상적인 유동 특성을 이해하고 결과적으로 나타나는 블레이드의 공력 특성을 정확하게 예측하는 것은 차세대 풍력 터빈의 성능 및 효율성 향상을 위해 무엇보다 중요하다 할 수 있다.

블레이드 공력 설계 시 주로 사용되는 BEM(Blade

† 한국과학기술원 항공우주공학과

\* 한국과학기술원 항공우주공학과

E-mail : ojkwon@kaist.ac.kr

Tel: (042) 350-3720, Fax: (042) 350-3710

\*\* University of Glasgow

Element Momentum) 및 Lifting-line 이론 등은 3차원 비정상적 유동에서 나타나는 블레이드의 공력 특성을 정확하게 예측하는데 근본적인 한계를 가지고 있다. 또한 이를 개선하기 위해 실속 지연(stall delay) 및 동적 실속(dynamic stall) 효과를 고려하여 수정된 2차원 에어포일의 공력 성능을 이용하지만 공력 예측의 정확성은 여전히 만족할 만한 수준에 이르지 못하고 있다. 이에 반해 Navier-Stokes 방정식을 이용한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석은 풍력 터빈 주위의 유동을 보다 실제적으로 모사할 수 있으며, 2000년대 들어서는 이를 이용한 풍력 터빈 블레이드의 공력 해석이 국내외적으로 많이 시도되었다. 하지만 국내에서는 바람이 로터 회전면(rotor disc)에 수직하게 들어올 때 나타나는 유동장의 주기적 특성을 이용한 정상상태 해석이 대부분이며[1], 국외에서는 Tongchitpakdee [2], 과 Benjanirat [3] 등이 요 자유흐름에서 나타나는 NREL Phase VI[4] 풍력 터빈 주위의 비정상 유동 해석을 수행한 바 있지만, 비정상 유동 및 공력 특성은 자세히 관찰하지 않았다.

본 연구에서는 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)와 VTM(Vorticity Transport Model)기법을 이용하여 요 자유흐름에서 나타나는 NREL Phase VI 로터 블레이드의 비정상 공력 특성을 관찰하고자 한다. 풍속과 요 각의 크기에 따른 영향을 관찰하기 위해 7m/sec와 15m/sec의 풍속에 대해 각각 30°, 60°의 요각을 갖는 경우에 대한 해석을 수행하였으며, 로터 허브(hub)와 나셀(nacelle)이 블레이드의 공력에 미치는 영향을 관찰하기 위해 로터 허브와 나셀을 포함한 계산을 추가적으로 수행하였다. 공력 계수들에 관한 실험과 해석 결과의 비교 통하여 요 자유흐름에서 나타나는 블레이드의 공력 특성을 관찰하였으며, 두 기법들이 가지고 있는 장단점에 대해 논의하였다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 RANS Solver

본 연구에서 사용한 CFD 프로그램[5]은 비정렬 혼합 격자에 기반 하였으며, 지배방정식으로는 삼차원, 점성, 비압축성 유동을 지배하는 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 에 인공압축성[6]을 추가한 방정식이며, 적분형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_V \vec{Q} dV + \tilde{K} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{Q}_0 dV + \oint_{\partial V} \vec{F}(Q) \cdot \vec{n} dS \\ = \oint_{\partial V} \vec{G}(Q) \cdot \vec{n} dS \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서  $V$ 는 제어체적을 나타내며,  $\partial V$ 는 제어 표면,

$\vec{n}$ 은 제어표면의 바깥방향으로의 법선벡터를 나타낸다.  $t$ 는 비정상 유동해석을 위한 실제 시간(physical time)을 나타내며,  $\tau$ 는 정상 유동의 시간전진을 위한 가상시간(pseudo time)을 의미한다. 유동변수  $\vec{Q}$ 와 행렬  $\tilde{K}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{Q} &= [p, u, v, w]^T \\ \tilde{K} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

$\vec{F}(Q) \cdot \vec{n} dS$ 와  $\vec{G}(Q) \cdot \vec{n} dS$ 는 각각 비점성 및 점성 유속을 나타낸다. 수치적 방법으로는 Euler 후방 차분법을 이용하여 지배방정식을 차분화 한 뒤, Jacobi/Gauss-Seidel을 이용하여 내재적으로 처리하는 방법을 사용하였으며, 공간 차분을 위해 Roe의 FDS(Flux Difference Splitting)방법을 사용한 격자점 중심(vertex-centered)의 유한 체적법(finite volume method)를 사용하였다. 난류모델로서는 Sparart-Allmaras의 1-방정식을 사용하였다. 요 자유흐름에서 나타나는 비정상 유동을 모사하기 위해 비정렬 중심 격자 기법[7]을 사용하였다.

본 연구에서는 그림 1에 나타난 바와 같이 로터 허브와 나셀의 존재 유무에 따라 구분되는 두 가지의 서로 다른 계산 격자계를 구성하였다. 블레이드, 로터 허브 그리고 나셀에서는 점착 조건을 부여하였으며, 경계층 포착을 위해 프리즘(prism)과 사면체(tetrahedron) 격자를 혼합하여 사용하였다. 총 격자점과 격자수는 각각 약 280만개와 989만개이며, 시간 전진을 위해 0.5°의 시간 간격을 사용하였다.

### 2.2 Vorticity Transport Model

VTM(Vorticity Transport Model)은 지배방정식의 보존 변수로서 와도(vorticity)를 이용하므로 와류의 수치적 소산을 크게 줄일 수 있다. 따라서 물체와 와류와의 상호간섭이 지배적인 문제에 매우 효과적인 방법이다. 본 연구에서 사용된 VTM 방법은 Brown[8]에 의해 개발되었으며, 지배방정식으로서 비압축성 Navier-Stokes 방정식의 와도와 속도로 변형된 형태(식 3)를 사용한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \omega + u \cdot \nabla \omega - \omega \cdot \nabla u = S + \nu \nabla^2 \omega \quad (3)$$

풍력 터빈 블레이드의 공기역학적 특성은 Lifting-line 이론을 바탕으로 하며, 소스항  $S$ 는 식 4에서와 같이 속박 와류  $w_b$ 에 의해 결정된다.

$$S = -\frac{d}{dt} \omega_b + u_b \nabla \cdot \omega_b \quad (4)$$

블레이드의 공력은 에어포일의 공력 성능 데이터를 이용하여 계산되며, 본 연구에서는 동적 실속과 실속 후에 나타나는 3차원 효과를 고려하기 위해 Leishman-Beddoes의 동적 실속 모델과 Corringan과 Schillings의 실속 지연 모델을 적용하였으며, VTM 계산에서는 로터 허브와 나셀이 고려되지 않았다.

### 3. 로터 허브와 나셀의 영향

실제 NREL Phase VI 풍력 터빈은 로터 앞뒤로 상대적으로 큰 허브와 나셀이 각각 장착되어 있다. 자유흐름이 로터 회전면에 수직하게 들어오는 경우, 이들이 블레이드의 공력에 미치는 영향은 상당히 작다. 이에 반해 요 자유흐름의 경우에는 로터 허브에 의해 발생된 후류의 영향으로 블레이드의 공력이 많이 달라질 수 있다. 그림 2는 이에 대한 영향을 정성적으로 보여주고 있으며, 블레이드가 방위각  $90^\circ$ 에 위치하였을 때, 로터 허브를 지나는 유선에 대한 RANS 결과들을 비교하고 있다.

허브의 영향을 정량적으로 비교하기 위해 그림 3에서는  $60^\circ$ 의 요 자유흐름에서 블레이드가 방위각  $90^\circ$ 에 위치하였을 때, 30%, 63% 그리고 95% 스패에서의 블레이드 표면에서 계산된 압력 계수의 분포를 비교하고 있다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 허브의 영향은 로터 중심으로 갈수록 크게 나타나며, 블레이드 끝단에서는 그 영향이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

그림 4와 5는 각각 7m/sec와 15m/sec의 경우에 대해 블레이드가  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ , 그리고  $270^\circ$ 에 위치하였을 때 스패 방향으로의 수직력 및 접선력 계수의 분포를 나타내고 있다. 그림 3의 압력 계수 분포에서 확인되었듯이, 허브의 영향은 로터 중심에서 상대적으로 크게 나타나며, 특히 블레이드가 방위각  $90^\circ$ 도에 위치하였을 때, 그 영향이 큰 것을 알 수 있다. 그림 5에서는 RANS의 결과와 실험결과가 비교되어 있는데, 방위각  $0^\circ$ 를 제외하고는 RANS의 결과가 실험값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며,  $0^\circ$ 에서의 부정확한 예측은 본 연구에서 사용된 난류모델에 난류로의 천이 효과가 고려되지 않는 데서 기인된 것이며, 이에 대한 내용은 5절의 '비정상 공력 특성'에서 보다 자세히 기술되었다.

### 4. 시간 평균 공력 결과

앞서 언급한 바와 같이 요 자유흐름의 경우 블레이드의 공력은 방위각에 따라 크게 변화한다. 본 절에서는 로터 한 바퀴에 대해서 평균된 공력 계수들을 실험값과 비교함으로써 본 연구에서 사용된 RANS 및 VTM 방법의 정확성을 검토하고, 풍속과 요 각의 변화에 따른 풍력 터빈 블레이드의 전반적인 공력 성능을 관찰하였다. 참고로 시간 평균 공

력 결과는 풍력 터빈 블레이드 주위에서 나타나는 공기역학적 물리현상 반영하진 않는다.

그림 6와 7은 7m/sec의 풍속에 대하여 각각  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ 의 요 각에 대한 블레이드 표면 압력 계수 분포의 시간 평균값을 나타내고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이  $30^\circ$ 도 요 각의 경우, RANS의 결과는 실험값과 블레이드의 모든 위치에서 잘 일치하고 있으며, 요 각이  $60^\circ$ 로 증가함에 따라 흡입면(suction side)에서의 흡입이 크게 감소한 것을 알 수 있다(그림 7). 이것은 요 각의 증가함에 따라 자유흐름의 축방향 성분이 감소하고 이로 인하여 블레이드 단면에서의 받음각이 전반적으로 감소했기 때문이다.  $60^\circ$ 도의 요 각의 경우 역시 RANS의 결과가 30% 스패의 앞전에서 흡입을 낮게 예측하는 것을 제외하고는 실험값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 8은 7m/sec의 풍속에 대하여 블레이드에 작용하는 수직력 및 접선력 계수의 시간에 대한 평균값을 나타내고 있다.  $30^\circ$ 도 요 각의 경우, RANS와 VTM의 결과 모두 실험값과 잘 일치하는 것을 알 수 있으며,  $60^\circ$ 의 요 각의 경우, RANS의 결과가 47%에서 블레이드 끝단까지는 실험값과 잘 일치하지만 블레이드 뿌리 부근에서는 약간의 차이가 나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 블레이드 뿌리 부근에서의 압력 계수를 부정확하게 예측했기 때문이다. 또한 요 각이 증가함에 따라 수직력 및 접선력 계수가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

그림 9와 10은 15m/sec의 풍속에 대하여 각각  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ 의 요 각에 대한 블레이드 표면 압력 계수 분포의 시간 평균값을 나타내고 있다. 그림 9에서 알 수 있듯이 RANS의 결과가 압력면(pressure side)에서는 여전히 실험값과 잘 일치하고 있는 반면, 흡입면에서는 블레이드 전 스패에서 실험값보다 흡입을 크게 예측하고 있다. 흡입면에서의 부정확한 예측은 풍속이 증가함에 따라 블레이드 단면에서의 받음각이 증가하고 이로 인하여 유동 박리가 발생하게 되는데 이 때 유동 박리점에 대한 예측이 부정확했기 때문으로 판단된다. 이는 근본적으로 본 연구에서 사용된 난류 모델에 층류에서 난류로의 천이가 고려되지 않았기 때문이다. 요 각이  $60^\circ$ 인 경우(그림 10), 압력 계수에 대한 정확성이 다시 향상된 것을 확인할 수 있는데, 이것은 요 각의 증가함에 따라 자유흐름의 축방향 성분이 감소하고 이로 인하여 블레이드 단면에서의 받음각이 전반적으로 감소했기 때문이다.

그림 11은 15m/sec의 풍속에 대하여 블레이드에 작용하는 수직력 및 접선력 계수의 시간에 대한 평균값을 나타내고 있다. 압력 계수의 부정확한 예측으로 인해 결과적으로 이 공력 계수들에 대한 RANS의 결과 역시 부정확하게 예측되고 있으며, 특히 흡입면의 앞전에서 흡입을 크게 예측한 결과로 접선력 계수가 실험값 비해 상당히 높게 예측되고 있다. 이와 대조적으로 VTM은 수직력과 접선력 계수들

을 실험값 보다 낮게 예측하고 있는데, 이것은 실속 후 블레이드의 회전에 의한 3차원 효과를 포착하지 못했기 때문으로 판단된다.

## 5. 비정상 공력 특성

요 자유흐름에서는 로터 회전면에 평행한 성분( $V_{\infty} \sin \beta$ )으로 인해 로터 방위각에 따라 유동 특성이 달라지고 결과적으로 블레이드에 비정상적인 공력 특성이 나타난다. 그림 12는 15m/sec의 풍속과 30° 요 각에서 블레이드의 흡입면에 나타나는 압력 선도를 보여주고 있다. 방위각 180° 근처에서는 블레이드의 앞전에서 강한 흡입이 나타나고, 0° 근처에서는 흡입 현상이 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 0°에서의 큰 받음각으로 인해 앞전에서 유동 박리가 발생하였음을 암시한다.

그림 13은 방위각 0°와 180°에서 수직력 및 접선력 계수에 대한 계산 결과를 실험값과 비교하고 있다. 방위각 180°에서는 RANS와 VTM의 결과가 실험값과 잘 일치하고 있는데 반해, 방위각 0°에서는 두 기법 모두 부정확한 결과를 보이고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 RANS의 경우 큰 받음각에서 나타나는 유동 박리점을 정확하게 예측하지 못했기 때문이며, VTM의 경우 로터 회전에 의한 3차원 효과를 포착하지 못했기 때문이다.

그림 14는 블레이드가 방위각 0°와 180°에 위치하였을 때 블레이드 흡입면에서의 limiting-streamline을 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 방위각 180°에서는 부착 흐름이 나타나고 있으며, 방위각 0°도에서는 블레이드 안쪽의 앞전에서 유동 박리가 발생하며, 유동 박리 후에는 로터 회전에 의한 원심력 효과로 강한 스핀 방향 흐름이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 15는 방위각 0°에서 블레이드 주위의 유선을 보여주고 있으며, 박리 후 나타나는 3차원 유동을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 RANS와 VTM 기법을 이용하여 요 자유흐름에서 나타나는 NREL Phase VI 풍력 터빈 블레이드의 비정상 유동 해석을 수행하였다.

7m/sec의 풍속의 경우, 두 기법의 예측 결과가 실험값과 잘 일치하였으며, 요 각이 증가함에 따라 블레이드의 공력 성능이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 로터 허브가 블레이드의 공력에 미치는 영향은 방위각 90°에서 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

15m/sec의 풍속의 경우, 로터 방위각에 따라 부착 흐름과 유동 박리가 반복되는 상당히 비정상적인 유동 특성이 나타남을 확인하였으며, 유동 박리가 심하게 나타나는 방위각 0°도에서는 RANS와 VTM의 결과가 실험값과 많은 차

이를 보이고 있음을 확인하였다. 요 각이 증가함에 따라 블레이드 단면에서의 받음각이 감소하여 해석 결과의 정확성이 다시 향상 되는 것을 알 수 있었다. 이러한 부정확한 예측은 RANS의 경우 큰 받음각에서 나타나는 유동 박리점을 정확하게 예측하지 못했기 때문이며, VTM의 경우 로터 회전에 의한 3차원 효과를 포착하지 못했기 때문이다.

## 후기

본 연구는 2010년 에너지 인력 양성 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) 강태진, 이세욱, 조진수, 경남호, "NREL Phase VI 로터에 대한 공력 해석", 한국항공우주학회지, 제 36권, 제 4호, pp. 315~320, 2008
- (2) Tongchitpakdee, C., "Computational Studies of the Effects of Active and Passive Circulation Enhancement Concepts on Wind Turbine Performance", Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology, May, 2007
- (3) Benjanirat, S., "Computational Studies of Horizontal Axis Wind Turbines in High Wind Speed Condition Using Advanced Turbulence Models", Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology, Dec 2006.
- (4) Hand, M. M., Simms, D. A., Fingersh, L. J., Schreck, S., and Larwood, S. M. "NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements", NREL TP-500-29494, Jun 2001.
- (5) Kang, H. J. and Kwon, O. J., "Unstructured Mesh Navier-Stokes Calculations of the Flow Field of a Helicopter Rotor in Hover," Journal of American Helicopter Society, 2002, 47, (2), 90-99.
- (6) A. J., Chorin, "A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems," Journal of Computational Physics, Vol. 2, No. 12, pp. 12-26, 1967.
- (7) Jung, M. S. and Kwon, O. J., "A Parallel Unstructured Hybrid Overset Mesh Technique for Unsteady Viscous Flow Simulations," International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, Antalya, Turkey, 21-24, May 2007.
- (8) Brown, R. E. and Line, A. J., "Efficient High-Resolution Wake Modeling Using the Vorticity Transport Equation," AIAA Journal, 2005, 43, (7), 1434-1443.

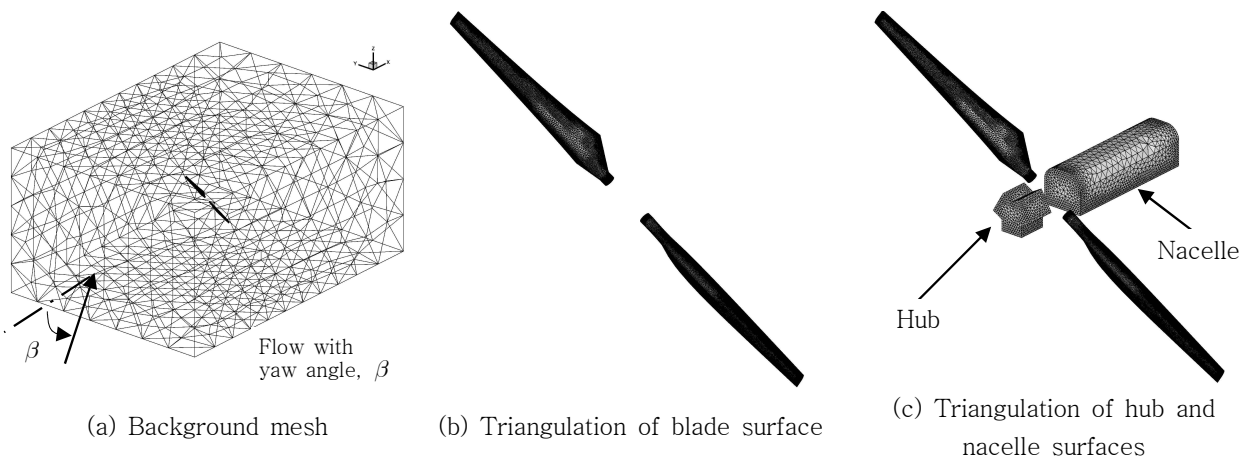


Figure 1: Computational meshes for the RANS calculations

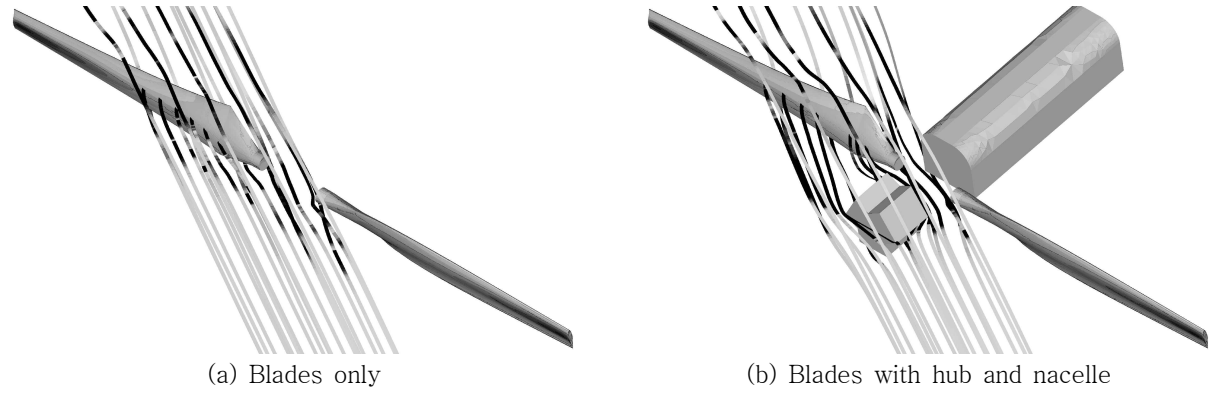


Figure 2: Streamlines around the rotor, and pressure contours on the blade surface, for 7m/s wind speed with the turbine at a 60° yaw angle.

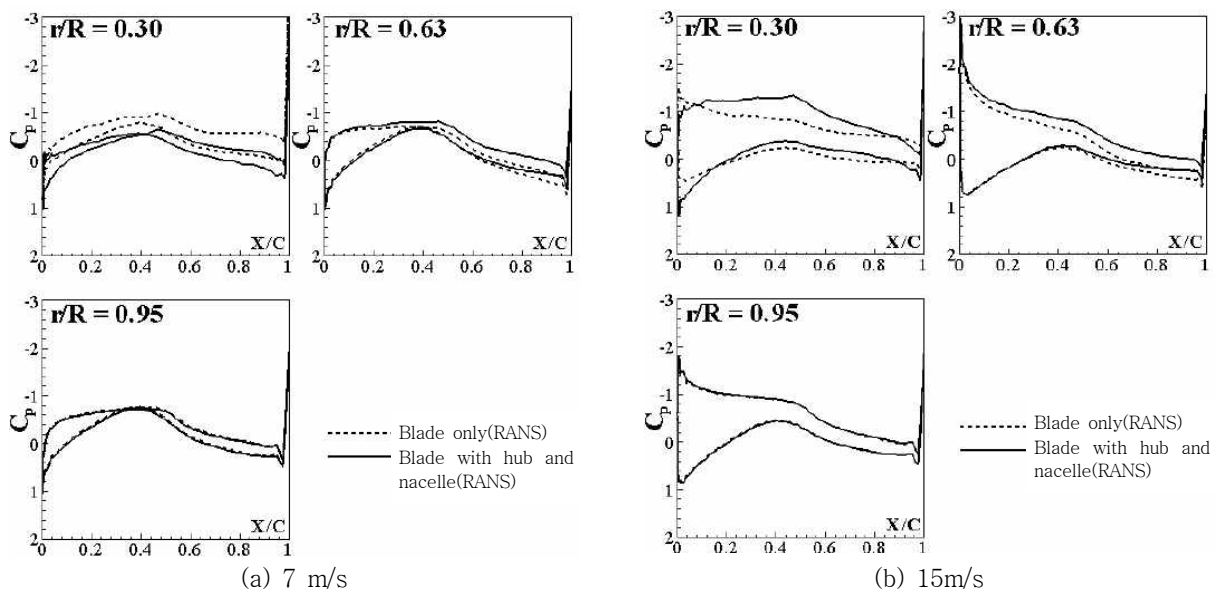
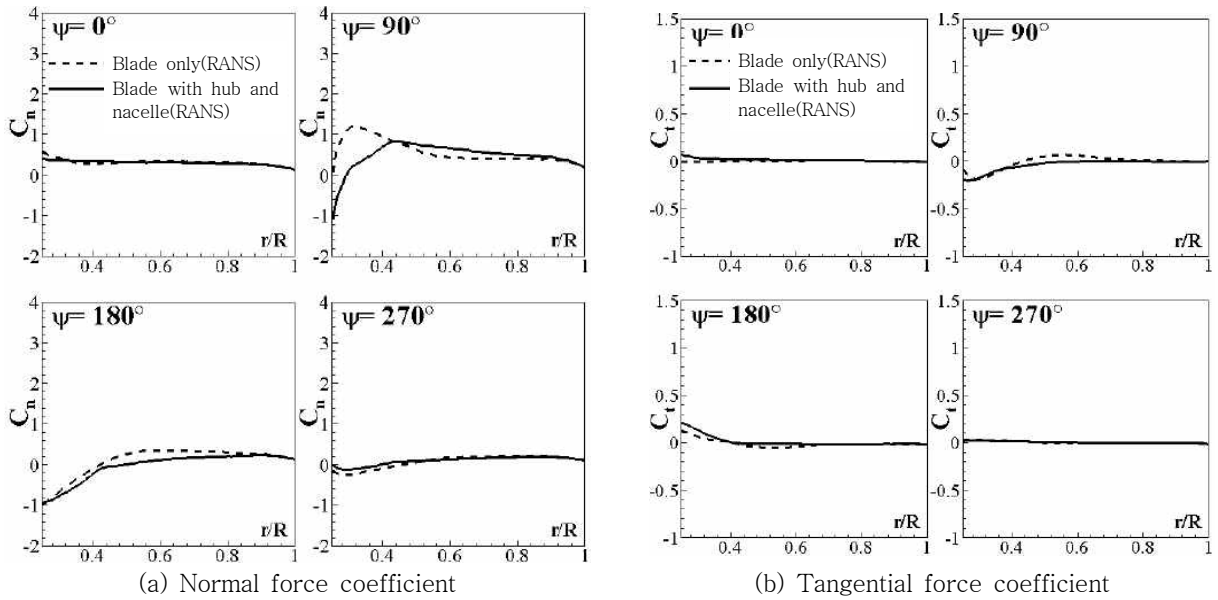
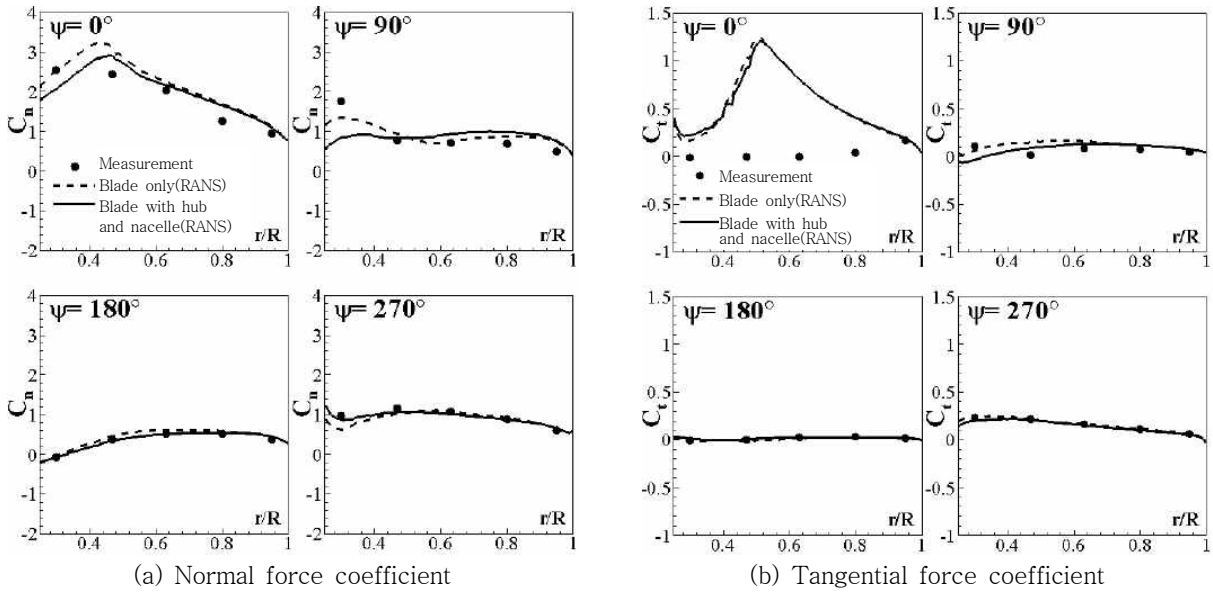


Figure 3: Chordwise distributions of instantaneous pressure coefficient at the three radial stations. The azimuth of the blade is 90° and the turbine is operating at a 60° yaw angle.



(a) Normal force coefficient (b) Tangential force coefficient  
 Figure 4: Radial distributions of instantaneous normal and tangential force coefficients along the blade when the turbine is operating at 7m/s wind speed with a 60° yaw angle.



(a) Normal force coefficient (b) Tangential force coefficient  
 Figure 5: Radial distributions of instantaneous normal and tangential force coefficients along the blade when the turbine is operating at 15m/s wind speed with a 60° yaw angle.

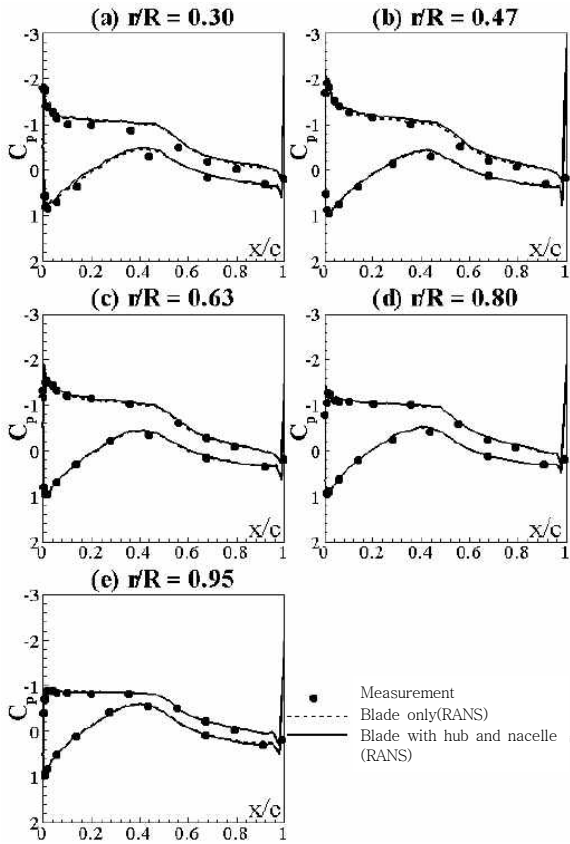


Figure 6: RANS-computed chordwise distributions of time-averaged pressure coefficient in a 7m/s wind speed whilst operating at a 30° yaw angle.

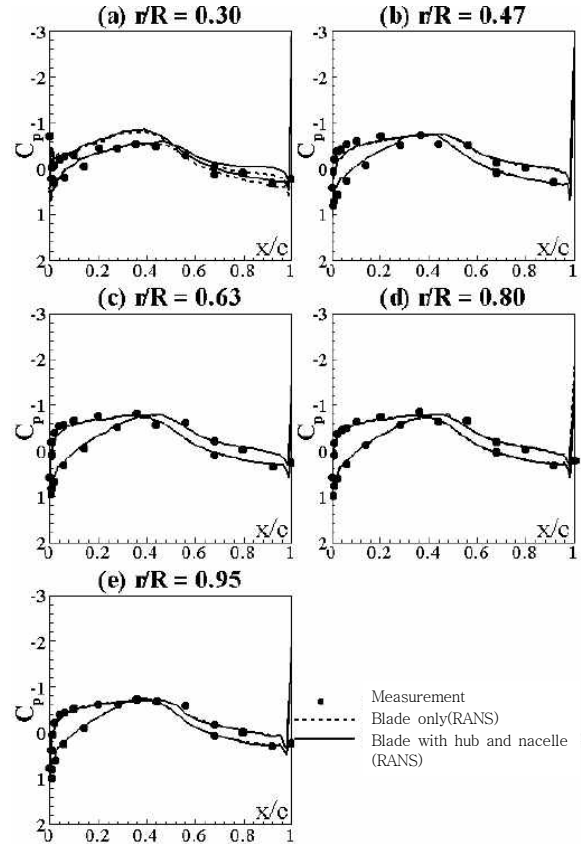
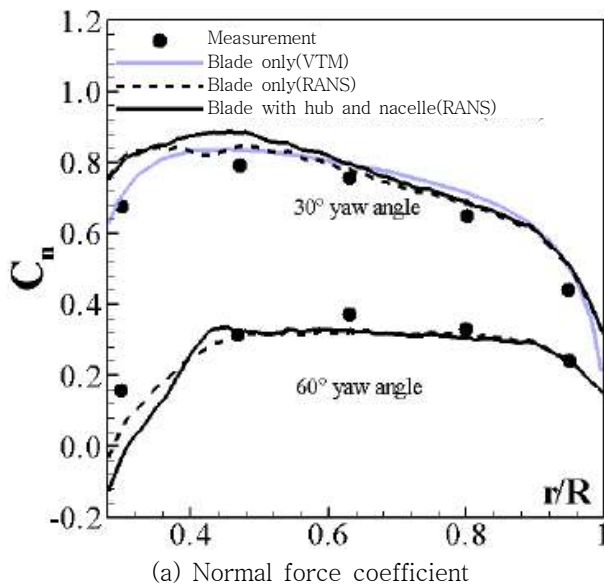
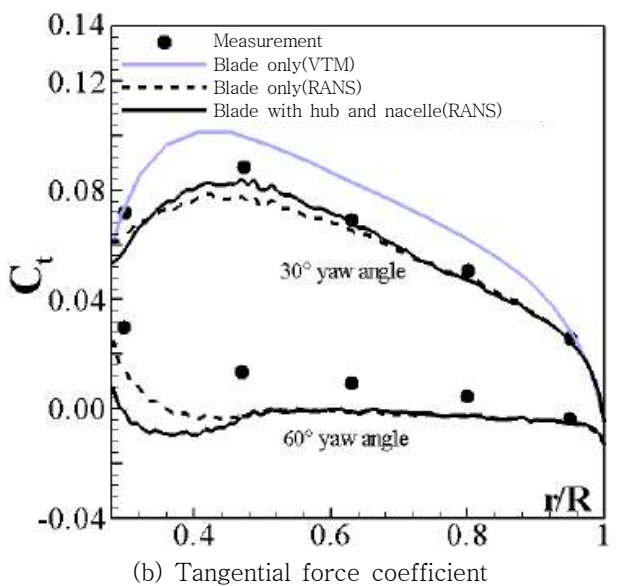


Figure 7: RANS-computed chordwise distributions of time-averaged pressure coefficient in a 7m/s wind speed whilst operating at a 60° yaw angle.



(a) Normal force coefficient



(b) Tangential force coefficient

Figure 8: Radial distributions of time-averaged normal and tangential force coefficients for 7m/s wind speed. Data for turbines operating at two different yaw angles are shown.



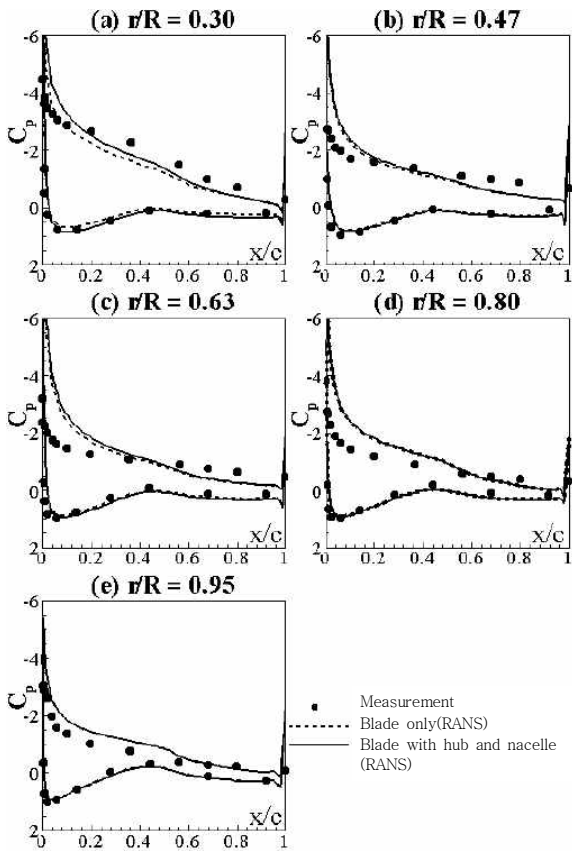


Figure 9: RANS-computed chordwise distributions of time-averaged pressure coefficient in a 15m/s wind speed while operating at a 30° yaw angle.

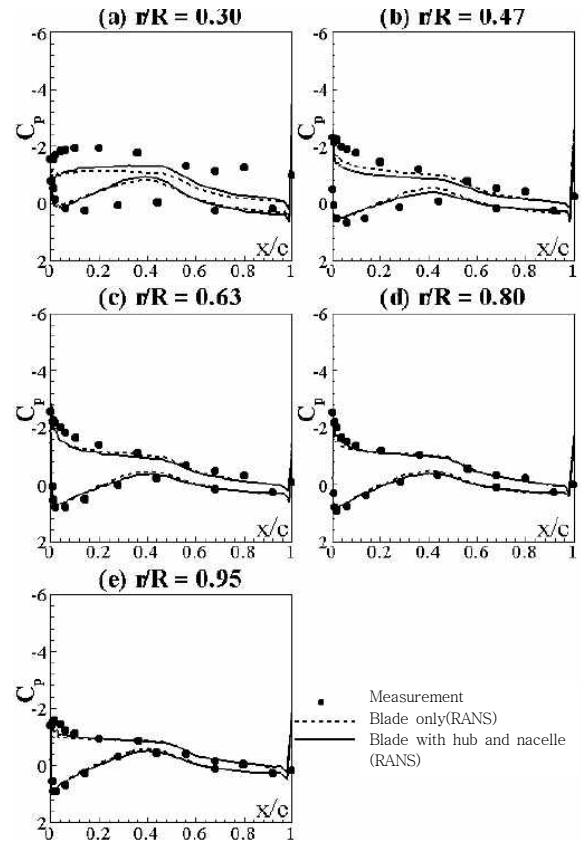
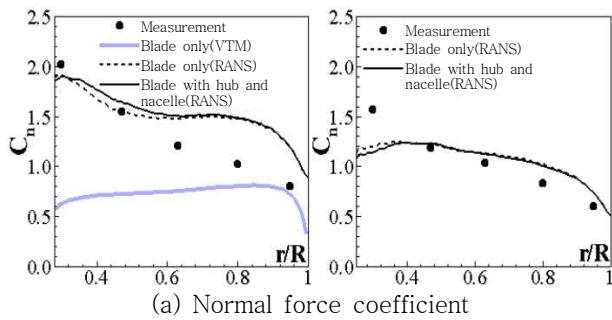
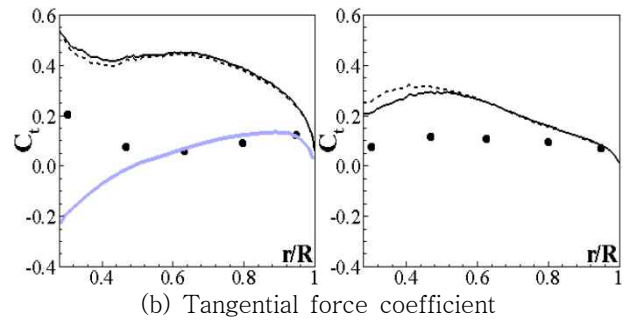


Figure 10: RANS-computed chordwise distributions of time-averaged pressure coefficient in a 15m/s wind speed while operating at a 60° yaw angle.



(a) Normal force coefficient



(b) Tangential force coefficient

Figure 11: Radial distributions of time-averaged normal and tangential force coefficients for 15m/s wind speed. Left: 30° yaw; right: 60° yaw.

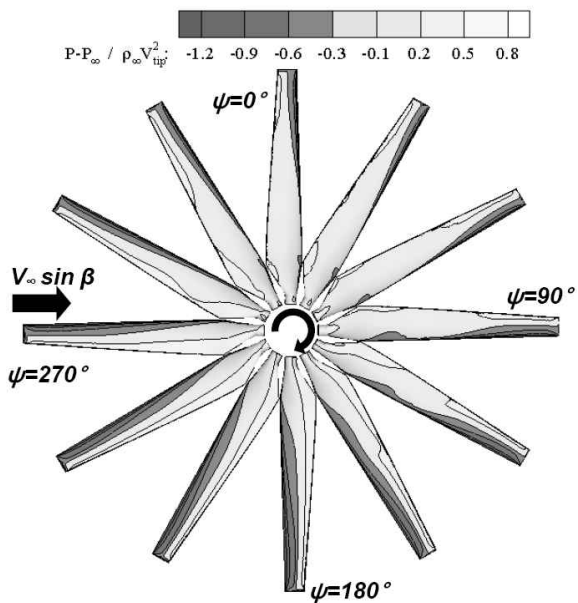
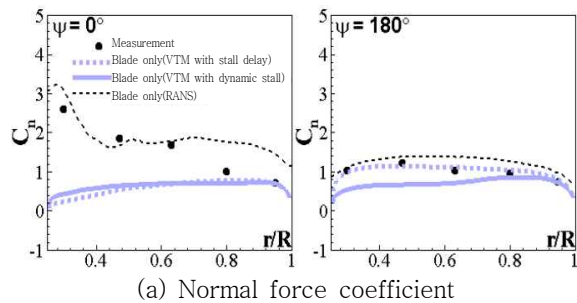
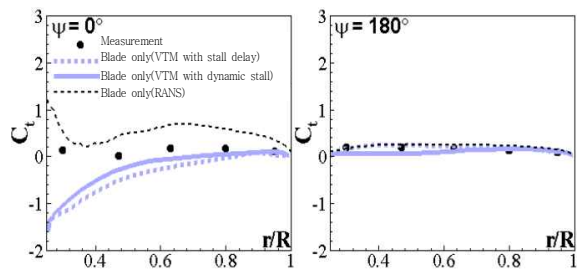


Figure 12: Instantaneous pressure contours computed by the RANS solver on the suction surface of the blades when the turbine rotor operates in a 15m/s wind at a 30° yaw angle.

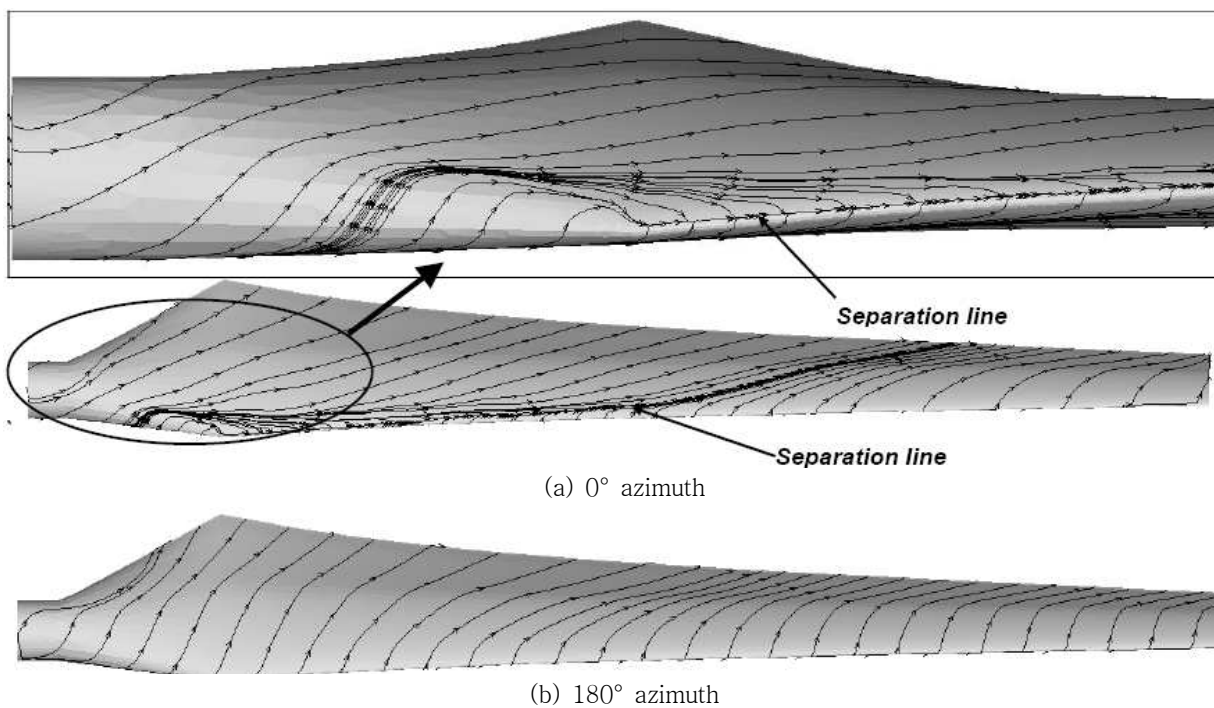


(a) Normal force coefficient



(b) Tangential force coefficient

Figure 13: Radial distributions of instantaneous normal and tangential force coefficients for 15 m/s wind speed with 30° yaw angle.



(a) 0° azimuth

(b) 180° azimuth

Figure 14: Instantaneous streamlines computed by the RANS solver for the suction surface of the blade for the turbine operating in a 15m/s wind at a 30° angle of yaw.

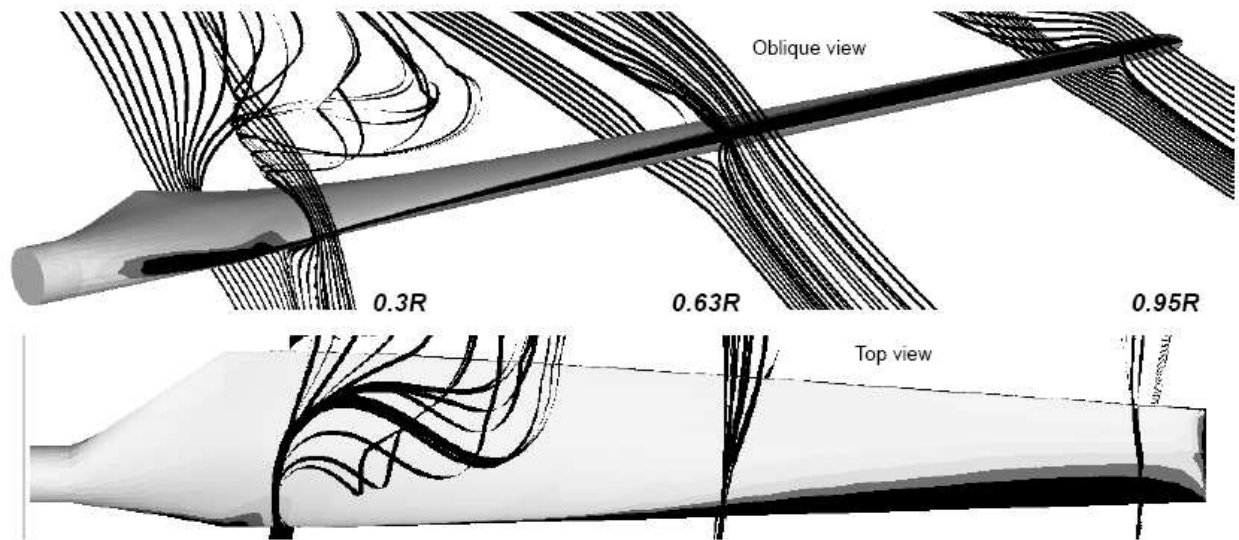


Figure 15: Instantaneous streamlines around the blade when it is located at  $0^\circ$  azimuth whilst in a wind of speed 15 m/s and the turbine is at a  $30^\circ$  angle of yaw.