

# 수평축 풍력발전용 터빈의 유동 해석을 위한 상용 CFD 코드의 적용성 평가에 관한 연구

김범석\* · 김정환\*\* · 남청도\*\*\* · 이영호\*\*\*\*

## A Study on the Evaluation for the Application of a Comn CFD Code to Flow Analysis of a HAWTs

B. S. Kim, J. H. Kim, C. D. Nam, Y. H. Lee

Key Word: CFD(Computational Fluid Dynamics), HAWTs(Horizontal Axis Wind turbines, 수평축 풍력터빈), Power coefficient(동력계수), Stall(실속), TSR(Tip Speed Ratio, 주속비)

### ABSTRACT

The purpose of this 3-D numerical simulation is evaluate the application of a commercial CFD code to predict 3-D flow characteristics of wind turbine. The experimental approach, which has been main method of investigation, appears to be its limits, the cost increasing disproportionately with the size of the wind turbines, and is hence mostly limited to observing the phenomena. Hence, the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques and Navier-Stokes solvers are considered a very serious contender. The flow solver CFX-TASCflow is employed in all computations presented in this paper. The 3-D flow separation and the wake distribution of 2 bladed Horizontal Axis Wind Turbines (HAWTs) are compared to Heuristic model and visualized result by NREL(National Renewable Energy Laboratory). Simulated 3-D flow separation structure on the rotor blade is very similar to Heuristic model and the wake structure of the wind turbine is good agree with visualized results.

### 1. 서 론

최근, 에너지 문제의 심각성을 인식한 선진 국가들

을 중심으로 다양한 형태의 대체 에너지에 대한 연구 활동이 활발하게 진행되고 있으며, 그 중 풍력발전이 새로운 대체 에너지 발전 방식으로써 가장 각광을 받고있다. 풍력발전은 이미 수많은 연구를 통하여 상당한 수준의 기술개발이 이루어진 상태이며, 실제 독일, 덴마크, 스페인 등의 유럽국가에서는 이미 상용화되어 안정적인 에너지 공급에 일익을 담당하고 있다. 국내에서도 새로운 대체에너지(renewable energy)에 대한 관심이 증가하면서, 한국에너지 기술연구소를 비롯한 몇몇 연구 기관 및 대학 등을 통하여 다양한 분야에서 풍력발전에 대한 본격적인 연구가 시작되고 있는 단계

\* 한국해양대학교 대학원  
\*\* 큐슈공업대학원  
\*\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부  
\*\*\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부  
E-mail : \* bum\_suck@pivlab.net,  
\*\* jhkim@hawts.com  
\*\*\* kmunam@hanara.kmaritime.ac.kr  
\*\*\*\* lyh@pivlab.net

이나, 그 수준은 상당히 미비한 실정이며, 실질적으로 풍력발전용 터빈의 핵심적인 요소라고 할 수 있는 로터 블레이드(rotor blade)의 성능평가 및 3차원 유동해석에 관한 연구는 전무한 실정이다.

세계적으로 상용화되고 있는 풍력터빈의 로터 블레이드의 직경은 수십 미터에 이를 정도로 대형화되어 가고 있는 추세다. 이에 따라 보다 가볍고 우수한 로터 블레이드를 설계하고자, 공기역학적(aerodynamic)인 최적 블레이드 설계에 관한 관심이 더욱 증가하였다. 로터 블레이드의 직경이 점점 대형화되면서, 복잡한 구조의 실속현상(stall-phenomena)등의 3차원적 유동현상들에 의한 영향으로 인하여 블레이드의 안정성에 대한 새로운 위험 요소들이 나타나기 시작하였다.<sup>[1]</sup>

복잡한 3차원적 유동해석과 더불어 로터 블레이드 설계자의 관점에서 또 하나의 이슈가 되고 있는 문제는 효율적인 설계를 위한 풍력발전용 터빈의 성능평가 기법의 확립이다. 이러한 문제들은 지금까지 대규모의 실험적 기법들에만 의존하여 왔으나, 실제 설계자들의 입장에서는 로터 블레이드 설계 시 필요한 익형(airfoil)의 공력설계 데이터의 확보 및 설계된 블레이드의 성능해석을 위하여, 매년 대규모 실험을 수행하거란 거의 불가능 한 일이다. 이러한 이유로, 최근 들어 Riso(Denmark), DTU(Denmark), DLR(Germany), FFA(Sweden)등의 연구소들을 중심으로 풍력발전용 터빈의 3차원적 유동해석 및 성능 해석을 위한, 상용 CFD 코드의 적용성 평가에 관한 연구가 진행되고 있다.

본 연구 이전에, 델프트 대학의 풍력연구단에 의해 설계된 500 kW급 수평축 풍력발전용 터빈 블레이드에 대한 3차원적 유동해석 및 성능 평가를 위하여, 이미 상용 CFD 코드인 CFX-TASCflow를 적용한 연구를 수행하였다. 하지만, 보다 정확한 유동해석 및 성능평가를 위하여 우수한 품질의 계산 격자와 높은 정도의 수치해석 기법을 통한 최적화된 수치해석적 연구의 필요성을 느끼게 되었으며, 설계시 필요한 양력(lift)·항력(drag) 데이터를 비교적 쉽게 확보 할 수 있는 NACA 0012 익형으로 설계된 단순한 형상의 2블레이드 풍력터빈에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다.

본 연구의 목적은, 풍력발전용 터빈의 로터 블레이드에서 발생하는 복잡한 3차원적 유동현상 해석에 있으며, 이를 바탕으로 보다 효율적으로 우수한 성능을 가지는 풍력발전용 로터 블레이드를 설계함에 있다.

## 2. 형상모델링 및 계산격자

### 2.1 로터 블레이드 3차원 형상 모델링

본 연구의 수치해석 대상으로 사용된 로터 블레이드는 DUT(Delft Univ. Technology)의 L.J. vermeer에 의해 설계된 2 블레이드 타입 수평축 풍력발전용 로터 블레이드이다.<sup>[2]</sup> 반경이 0.6 m 이고, 시위길이(chord length)는 0.08 m 이며, 허브 연결부(root cutout)의 길이는 블레이드 반경의 30 %인 0.18 m에 해당한다. 허브와 블레이드를 연결하는 부분의 형상은 모델링의 단순화를 위하여 생략하였다. 블레이드 팁 부분으로부터 허브 부분으로 0.06 m 까지의 비틀림 각도  $\theta$ 는  $0^\circ$  이며, 0.06 m 이후로 허브부분까지의 비틀림 각도는 다음의 식을 따른다.

$$\theta(r/R) = (6^\circ + \theta_{Tip}) - 6.67 r/R \quad (1)$$

여기서,  $r/R$ 은 블레이드 반경  $R$ 과 국부 위치에서의 반경  $r$ 을 나타낸다.

식 (1-1)에 따라, 본 연구의 수치 해석 모델로 사용된 2 블레이드 타입의 로터 블레이드의 비틀림 각을 계산 할 수 있다. 로터 블레이드의 root cutout 부분에서의 비틀림 각은  $+4^\circ$  이다. 모델링된 로터 블레이드의 상세 제원을 Table. 1에 요약하여 나타내었으며, 3차원 전문 캐드 모델링 툴인 CATIA를 이용하여 모델링한 3차원 로터 블레이드의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

Table. 1 Specifications of the model

Number of blade	2
Airfoil section	NACA 0012
Chord length	0.08 m
Radius	0.6 m
Root cutout	0.18 m(30 %)
Blade length	0.42 m
Replaceable tip	0.06 m, $\theta : 0^\circ$
Blade twist	
$\theta(r/R) = (6^\circ + \theta_{Tip}) - 6.67 r/R$	

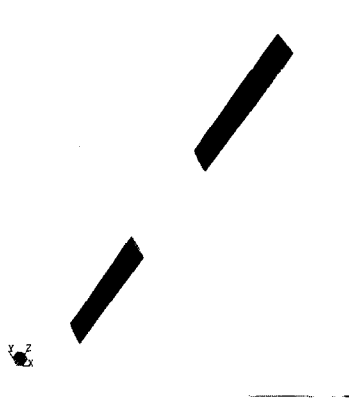


Fig. 1 Configuration of the rotor blade

## 2.2 계산격자의 생성

수치해석 결과의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나가 계산 격자의 품질문제라고 할 수 있다. 본 연구에서는 복잡한 형상의 3차원 정렬 다중 블록 격자계(Structured multi-block grid system)를 상당히 우수한 품질로 생성 할 수 있는 ICEM-CFD Hexa 모듈을 이용하여 생성하였다. 계산 격자를 생성함에 있어, 저 레이놀즈 수 난류 모델을 적용함에 따라 신뢰성 있는 해석결과를 확보하기 위해선 벽 근처 격자의 밀집도에 상당한 신경을 써야만 한다.<sup>[3]</sup> 따라서 본 연구에 사용된 격자계에서 로터 블레이드 표면에 집중된 첫 번째 격자 점은  $y^+ \leq 2$  하였다. 격자를 생성하는 과정에서 블레이드 주위의 격자 품질도를 높게 유지하기 위하여, 전체 도메인을 총 32 블록으로 구획하였으며, 블레이드를 감싸는 블록은 O-grid로 처리하였고, 다른 부분의 격자는 H-type 격자계로 구성하였다.

계산 PC의 계산 용량 문제로 반드시 생성 가능한 격자점 수의 한계가 발생한다. 블레이드 표면에 보다 조밀한 격자를 생성하기 위하여 전체 도메인을 기준으로 격자점을 제어 하다보면 상당히 많은 격자 점을 필요로 하나, 본 연구에서는 블레이드를 감싸는 O-grid 주변 격자점의 정보를 바탕으로, 격자 리파인먼트(mesh-refinement) 과정을 거쳐, 블레이드 주변 블록에만 초기에 생성된 격자보다 3배 더 조밀한 격자를

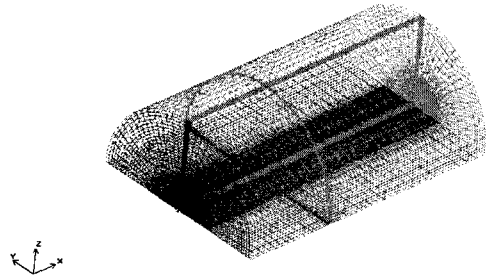


Fig. 2 Computational grid (full domains)

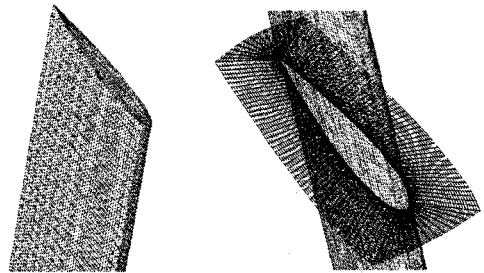


Fig. 3 Computational grid near the rotor

생성하였으며, 격자점은 Solver에서 제공하는 노드매칭(node matching) 기능인 arbitrary(GGI)를 이용하여 매칭시켰다. 전체 격자수는 540,000 개이다.

Fig. 2에 본 연구에 사용된 계산격자를 나타내었으며, Fig. 3에 블레이드 표면격자의 확대 모습을 나타내었다.

## 3. 수치해석기법 및 계산조건

### 3.1 수치해석 기법

CFX-TASCflow는 3차원 레이놀즈 평균 나비에 스톱스 (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 적용하며, 지배방정식은 유한체적법에 (Finite Volume Method) 의하여 이산화 된다. 본 수치계산은 3차원 비압축성 정상상태 유동조건 하에서 수행되었다. 상용 CFD 코드에서 기본적으로 제공되는 표준  $k-\epsilon$  모델은, 저 레이놀즈 수를 갖는 유동의 표면박리 현상을 정확하게 예측할 수 없는 단점을 가지고 있다고 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 로터 블레이드 표면에서 발생하는 3차원적 유동박리 현상에 대한 영향을

반영하여, 표준  $k-\epsilon$  모델, 표준  $k-w$  모델에 비하여 비교적 정확한 예측이 가능하다고 알려져 있는 SST (Shear Stress Transport)  $k-w$  모델을 적용하였다. 대류항의 이산화 기법으로는 2차정도의 정확도를 가지는 MLPS (Modified Linear Profile Skew)를 적용하였다.

### 3.2 경계조건

입구조건으로써 균일 속도유입조건을 주었으며, 출구 조건은 출구영역으로 정의된 부분에 대기압력 조건을 부여하였으며, 전체 격자계는 블레이드와 허브를 포함하는 부분에 대해 회전하는 상대 좌표계로 설정하였다. 효율적인 계산을 위하여, 하나의 블레이드를 포함하는 영역에 대해서만 계산을 수행하였으며, 분할된 경계면은 주기조건으로 처리하였다.

### 3.2 계산조건

CFD의 풍력발전용 로터 블레이드 성능 평가에 대한 적용성 평가를 위하여, 동일한 형상으로 델프트 대학 풍력에너지연구단에서 수행된 실험데이터와의 비교를 하였다. 실험 데이터에서는 주속비(Tip Speed Ratio)의 변화에 따른, 로터 블레이드의 동력계수를 나타내고 있으며, TSR은 1~12의 범위를 가진다. TSR은 무차원 수이며 그 정의는 다음과 같다.

$$TSR = \frac{R\Omega}{V_{inlet}} \quad (2)$$

여기서,  $R$  : 블레이드 반경 (m)

$\Omega$  : 회전 각속도 (rpm)

$V_{inlet}$  : 바람의 유입속도 (m/s)

본 연구의 계산 조건으로 정의된 TSR의 범위는 실험 조건과 정확히 일치하며, Table 2에 요약하여 나타내었다. 모든 계산은 Pentium 4 PC (1.7 GHz, 1Gb Ram)에 의해 수행되었으며, 모든 계산은 Iteration이 약 150번 정도 내에서 원활히 수렴하였다. 계산에 앞서 원활한 해의 수렴성과 안정성을 위하여, 초기에 약 100,000개의 격자수를 가지는 격자계에 대한 기초계산을 수행한 후 U, V, W 방향의 속도 성분과 대략적인 유동장의 기본정보를 획득하여 본 계산의 초기 조건으로 이용하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 3 차원적 유동현상에 대한 고찰

풍력발전용 터빈의 성능해석에 있어서 3차원적 영향이라 함은 날개 끝 손실(tip loss)과 로터 블레이드 표면에서 발생하는 3차원적 실속을 대표적으로 들 수 있다. 항공기의 날개에서는 날개 상면(upper surface)과 하면(lower surface)의 압력 차에 의하여 날개 끝에서 와류(tip vortex)가 발생하게 된다. 이러한 날개 끝 와류에 대한 영향으로 날개주위의 순환(circulation) 분포가 감소되므로, 양력 손실이 발생하게 되며, 이는 풍력발전용 로터 블레이드의 경우에서도 동일하게 발생하는 현상이다. 이론적 성능 해석 기법 중 이러한 3차원적 날개 끝 손실에 대한 영향을 반영하고자, 실제 블레이드 길이의 97 % 만을 고려하는 유효반경법, Prandtl과 Goldstein에 의해 제시된 날개 끝에서의 순환감소모델을 적용하여 계산하는 방법들이 있으며, 본 연구에서는 상용 CFD 코드를 이용한 로터 블레이드의 성능해석을 목적으로 하므로, CFD 해석결과에 의한 날개 끝 와류의 유동현상에 대하여 검토해 볼 필요가 있다.

Fig.4에 회전하는 로터 블레이드의 팁 부분에서 발생하는 팁 와류에 대한 계산결과를 TSR이 1, 3, 5 일 때의 경우에 대하여 차례로 나타내었다. TSR이 1일 경우의 결과를 살펴보면, 회전속도가 8.333 rpm로 상당히 저속회전을 하고 있으므로, TSR이 2, 3인 경우의 결과에 비하여, 복잡한 구조의 와류가 발생하고 있지 않고, TSR이 점점 증가할수록 로터 블레이드의 회전 속도 또한 점점 증가하게 되므로, 날개의 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)에서의 압력차가 점점 커짐으로써, 팁 부분에서 발생하는 와류의 구

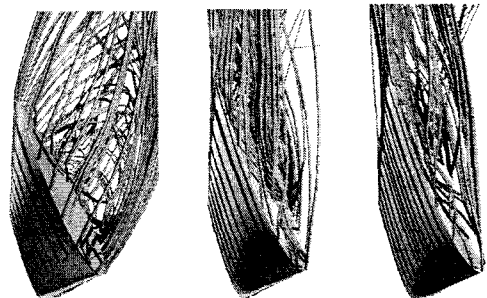


Fig. 4 Tip vortex (TSR : 1, 3, 5)

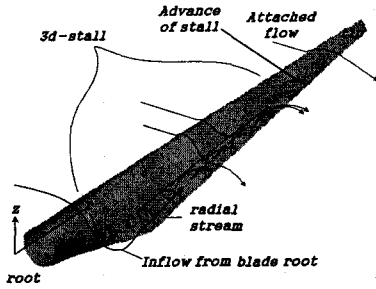


Fig. 5 Sketch of blade surface vortex structure<sup>[4]</sup>

진 또한 복잡한 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에 로터 블레이드에서 발생하는 와류의 구조를 스케치한 그림을 나타내었다.

로터 블레이드의 표면에서 발생하는 와류의 구조는 Fig. 5에서 스케치한 것처럼 상당히 복잡한 구조를 가진다. 로터 블레이드의 허브 부분에서 발생하는 유동박리현상에 의하여 분리된 기류는 로터 블레이드의 원심력과 블레이드 반경방향으로의 압력분포 차에 의하여, 블레이드의 허브쪽에서 팁 쪽으로 점진적으로 이동하게 된다. 이러한 기류는 로터 블레이드의 회전방향으로 빠져나가는 기류의 흐름을 방해하며, 블레이드 표면에서 강제적으로 복잡한 구조의 와류를 발생시키게 된다. 그 후, 블레이드의 반경방향으로 흐르는 기류는 임의의 지점에서 로터 블레이드의 회전방향으로 이탈하며 빠져나가게 된다. 반경방향으로 흐르는 기류는, 원심력, 블레이드 반경방향에 따라 발생하는 압력차 등에 의하여 발생 할 수도 있지만, 블레이드 전체에 걸쳐 익형의 전연과 후연에서도 동일하게 발생할 수 있다고 보고 되어있으며, 그 영향 또한 크다고 알려져 있다.<sup>[4]</sup>

Fig. 6에 TSR의 변화(TSR : 1, 3, 5, 7)에 따라 로터 블레이드 표면에서 발생하고 있는 와류에 대한 수치해석 결과를 나타내었다. 모든 계산결과에서, 로터 블레이드의 압력면으로 불어들어 오는 바람은 허브 쪽에 위치한 블레이드 끝단에서부터 흐름이 분리되어 로터 블레이드 표면을 타고 블레이드 팁 부분으로 점점 진행되다가, 임의의 지점에서 로터 블레이드의 회전방향으로 빠져나가는 경향을 보이고 있으며, 이는 Fig. 5에서 스케치한 결과와 상당히 유사한 결과이다. TSR이 1인 경우 로터 블레이드의 회전속도가 비교적 저속으로 회전하기 때문에, TSR이 3, 5, 7인 결과에 비하

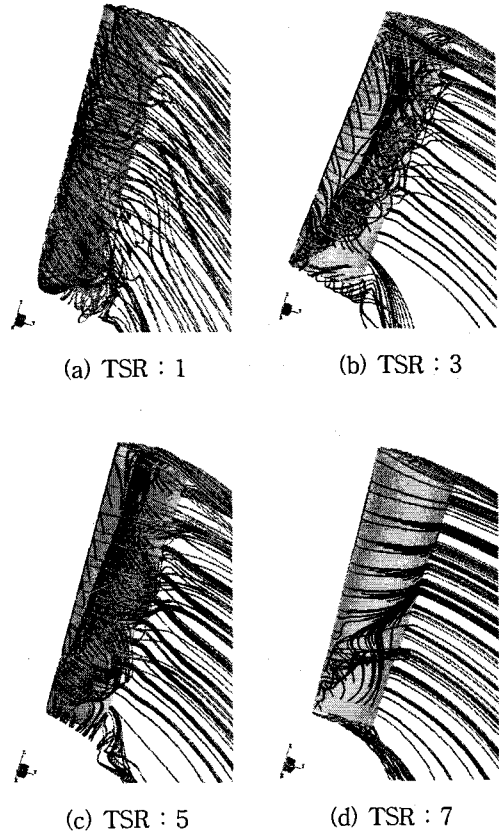


Fig. 6 Surface vortex distributions at a rotor blade

여 상대적으로 블레이드 표면 쪽으로 와류가 부착되는 현상이 덜하고, 원심력, 허브와 팁쪽의 압력차에 대한 영향을 덜 받고 있음을 확인 할 수 있다. TSR 값이 증가할수록 로터 블레이드의 회전속도는 빨라지므로, 원심력( $\omega^2 R$ )의 정의에 의하여, 와류의 분포는 점점 팁 쪽으로 이동하게 되며, 블레이드 표면에 부착되는 경향을 나타내고 있다. 회전속도가 점점 빨라져 TSR이 7인 지점에 이르게 되면, 상당히 복잡한 패턴의 3차원 와류는 거의 소멸되고, 허브 쪽 블레이드 표면을 따라 진행되는 기류의 흐름은 로터 블레이드의 약 1/3 지점에서 회전방향으로 분리됨을 알 수 있다.

Fig. 7에 NREL(National Renewable Energy Lab.)에 의해 수행된, 2 블레이드 풍력발전용 터빈의 후류 모습을 가시화 한 결과<sup>[5]</sup>를 나타내었다.

Fig. 8에 TSR 3인 경우의 블레이드 후방으로 발달하는 후류의 수치해석 결과를 나타내었다.

## 5. 결론

본 연구는 NACA 0012 익형으로 설계된 2 bladed HAWT의 유동해석에 대한 상용 CFD 코드의 적용성 평가에 그 목적을 두며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 로터 블레이드의 성능에 영향을 미치는 날개 끝 와류에 대한 유동해석 결과를 제시하였으며, TSR이 증가할 수록 날개 끝에서 발생하는 와류의 구조는 점점 복잡한 패턴을 나타내고 있으며, 로터 블레이드의 후류 방향 보다, 회전 방향으로 복잡한 구조의 나선형 와류가 발달하고 있음을 알 수 있다.

2. 로터 블레이드 표면에서 발생하는 와류에 대한 유동해석을 수행하였으며, 이는 Gustave P. Corten에 의해 제시된 로터 블레이드 표면 와류구조의 유동특성과 정성적으로 상당히 유사한 패턴을 나타냄을 알 수 있다.

3. 로터 블레이드 후류에 대한 수치해석 결과를 NREL의 2 블레이드 풍력발전용 터빈의 가시화 결과와 비교하였으며, 로터 블레이드 팁 부분의 영향으로 발달하는 후류의 구조는 두 결과가 상당히 유사한 패턴을 보이고 있으며, 허브 쪽 끝단에 의한 영향으로 후방으로 강한 선회를 하며 발달하는 중심와류에 대한 영향도 알 수 있었다.

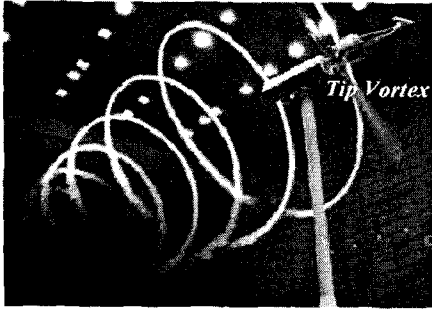


Fig. 7 Wake visualization (tip vortex) 10 m HAWT by NREL<sup>[5]</sup>

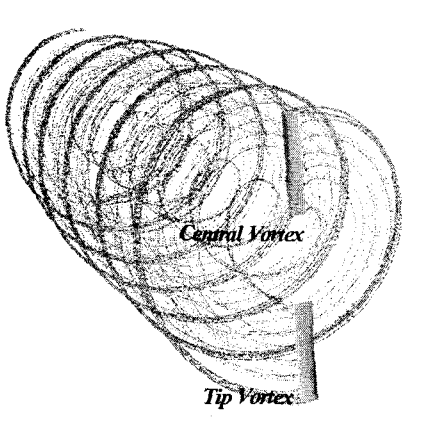


Fig. 8 Wake simulation result of 2 bladed HAWT

Fig. 8에서 나타난 수치해석 결과를 살펴보면, 로터 블레이드 후방으로 발달하는 후류는 크게 로터 블레이드 끝단의 영향으로 발생하는 날개 끝 와류와 로터 블레이드 허브 쪽 끝단의 영향으로 발생하는 중심와류로 구분되어 집을 알 수 있다. 두 가지 경우 모두 상당히 복잡한 3차원 유동구조를 보이고 있음을 알 수 있으며, Fig. 7에서 실험에 의해 제시된 날개 끝 와류의 가시화 결과와 비교해볼 때, 본 계산에 의한 유동해석 결과는 상당히 만족스러운 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 2 블레이드 로터 블레이드의 날개 끝의 영향으로 발생하는 후류의 모습만을 가시화 한 결과이므로, Fig. 8에서 제시한 수치해석 결과에서 나타난 중심 와류의 구조는 나타나고 있지 않음을 알 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Jess A. Michelsent and Niels N. Sorensent, "Current Developments in Navier-Stokes Modelling of Wind Turbine Rotor Flow," Proc. of the EWEC, 2001, pp. 367-372
- [2] L.J Vermeer, "A Review of Wind Turbine Wake Research at TUDELFT," AIAA-2001-0030
- [3] CFX-TASCflow Users Documents, AEA Technology Engineering Software
- [4] Gustave P. Corten, "Inviscid Stall Model", Proc. of EWEC, 2001, pp. 466-469
- [5] Simoes, F. J and Graham, J. M. R., "A Free Vortex Model of the Wake of a HAWT," Proc. of 12th British WEAC, 1990, pp. 161-165