



## 비틀림각에 따른 HWAT의 공력특성 전산해석

이 명 수,<sup>\*1</sup> 유 성 수,<sup>1</sup> 황 도 연,<sup>1</sup> 한 병 윤,<sup>1</sup> 박 형 구<sup>2</sup>

### CFD ANALYSIS OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF HWAT BASED ON THE DIFFERENT TWIST ANGLE USING CFD

M. S. Lee,<sup>\*1</sup> S.S. Yoo,<sup>1</sup> D.Y. Hwang,<sup>1</sup> B.Y. Han<sup>1</sup> and H. K. Park<sup>2</sup>

*The objective of this study is to investigate aerodynamic characteristics of a Horizontal-axis wind turbines(HAWT), using CFD method with a commercial code STAR-CCM+ version 3.06. To verify the reliability of the computations, the CFD results are compared with the experimental ones of the National Renewable Energy Laboratory(NREL) Phase VI HAWT. For the comparison and examination of aerodynamic characteristics, the existent shape with a predesigned twist angle was replaced by the one with one-dimensional linear twist angle. In this study, the pressure contour and stream line around the blade were analyzed as main focus. Through this study the more efficient shape of airfoil is suggested with consideration of manufacturing cost.*

**Key Words** : S809 에어포일(S809 Airfoil), 비틀림각(Twist Angle), 다좌표계법(MRF), 이동격자계법(6M)

### 1. 서 론

전 세계적으로 신재생 에너지원에 대한 중요성이 크게 대두되고 있는 가운데 그 가능성 측면에서 가장 큰 주목을 받고 있으며, 상용화 부분에서 효율성이 높은 에너지원은 풍력 에너지이다. 선진국에서는 풍력 발전에 관련한 지속적인 연구가 수행되어지고 있으며 풍력 발전을 상용화하고 있으나 우리나라의 경우 아직 이에 대한 기본 기술을 확보하지 못하고 있으며, 외국 기술에 의존하고 있는 것이 현실이다

에너지 독립국가로서 신재생에너지를 개발 및 보급하기 위해서는 우리나라만의 독자적인 기술력이 필요하며 이에 준하여 풍력터빈에 대한 기본 연구가 필수적이며 매우 중요하다

현대의 풍력 터빈의 특징은 크게 기기의 대형화와 대형 풍력 발전 단지들의 형성으로 볼 수 있다 이는 블레이드 직경과 출력 규모가 해마다 상승하고 있으며, 2000년대에 이르러 직경 60~70 m, 출력은 1000~1500 kw인 MW급 풍력발전도 상

용화 되고 있으며 해상 풍력 발전용으로는 더욱 더 대형화가 진행되고 있는 것이 현실이다

일반적으로 새로운 풍력 터빈을 설계하기 위해서는 많은 시간과 자본이 요구된다 그러나 전산해석(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용하면 이론적 배경을 통한 신뢰성 있는 해석이 가능하고 실제 풍력 터빈의 작동환경과 비슷한 물리적 변수를 조건으로 쉽게 활용할 수 있으므로 설계주기를 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 소요되는 실험분량을 줄임으로써 투자의 효율성 또한 높일 수 있다

또한 전산해석을 통해서 설계된 블레이드에 대하여 적절한 형상변경을 수행하게 된다면 블레이드 주변의 유동장 변화를 예측할 수 있고 나아가 풍력터빈 성능을 효율적으로 예측할 수 있다.

풍력발전에 대한 다양한 연구는 국내보다 국외에서 활발히 진행되고 있다. 주로 NREL, RISO, NASA 등의 정부 및 대학 연구 기관에서 진행되고 있으며 다양한 풍동 실험의 결과를 얻어 이를 실제 상용화에 이용하였다

Nilay[1]등은 LES(Large Eddy Simultaion)를 이용하여 yaw각에 따른 유동해석을 수행하여 유동장 및 pre-stall등을 해석하였으며, K.G.Roads[2]등은 k-ε, k-ω모델에 대하여 블레이드 후류의 영향을 예측하였으며 Wubou[3]는 상용코드인 Fluent를

1 학생회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 전남대학교

\* Corresponding author, E-mail: lmsgolf@naver.com

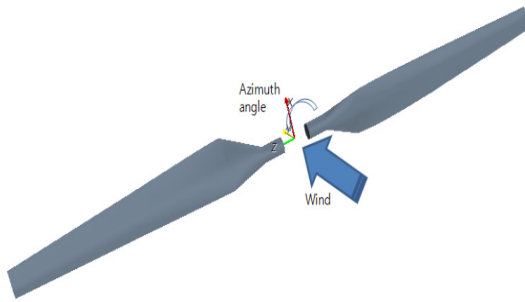


Fig. 1 Configuration of the blades.

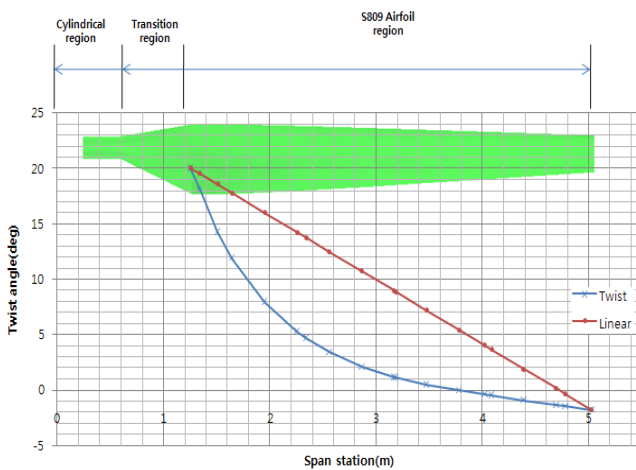


Fig. 2 Blade twist distributions for Phase VI HAWT model.

사용하여 near wake 영역의 속도장 및 난류강도를 계산하였다 그러나 이러한 논문의 경우 신뢰성 검증에 있어서 NREL과 같은 연구기관에서 제시하는 실험값에 의존하고 있는 것이 현실이다.

Manabu Takao[4]등은 수직형 풍력발전기에 대하여 주속비 (Tip speed ratio, TSR)에 따라 Guide-vane의 유무에 따른 압력 계수를 실험으로 측정하였으나 이 연구에서 제시하는 수평형 풍력발전과는 다소 거리가 있다

우리나라에서도 풍력발전과 관련된 여러 연구들이 진행되어 지고 있다. 특히 이 연구에서 제시하고 있는 NREL Phase VI HAWT 모델에 대하여 강태갑[5]등은 후류해석을 수행하여 로터의 직경의 14배에서도 원래의 유속을 회복하지 못하는 것을 확인하였으며, 전방풍력터빈의 후방풍력터빈에 미치는 영향에 대해 연구하였다

이 논문에서는 전산해석 상용코드인 STAR-CCM+ Version 3.06을 이용하였으며 NREL에서 실험한 Phase VI HAWT 모델의 반경방향 단면의 pressure coefficient를 실험결과와 비교하였다. 이를 통해 블레이드에 작용하는 압력에 대하여 유동

가시화를 하였으며 설계 풍속에서의 부착흐름(attached flow)을 확인하였다

또한 실제 블레이드 모델에 대해서 비틀림각을 고려하여 기존의 형상에서 비틀림각을 1차 선형 직선으로 설계하였을 때에 대한 공기역학적 특성과 압력장에 대하여 비교 및 검토를 하였다

이는 기존의 블레이드 요소 이론 (Blade Element Momentum theory, BEMT)에 의한 접근이 아닌 실제 소형 풍력발전 블레이드 제작의 효율성을 고려한 측면으로서 향후 진행될 연구에 대한 시작단계의 논문이라 할 수 있다

또한 전산해석을 수행함에 있어서 그 차이를 다좌표계법과 이동좌표계법을 이용하여 그 결과를 비교 및 검토해보았다

## 2. 본 론

### 2.1 풍력터빈 모델의 구조

이 논문에서 전산해석을 수행한 블레이드 모델은 NREL에서 연구용 풍력터빈으로서 제작한 Phase IV 모델로서 블레이드 형상에 대한 정보 및 실험 조건등이 잘 기술되어 있으며 이를 정확한 형상으로 구현이 가능하고 신뢰성 측면에서도 쉽게 비교할 수 있다.

NREL Phase IV 모델은 2개의 블레이드로서 직경이 10.058m이며, 피치는 75% span에서 피치축은 30%로 chord line이며, Global pitch angle는 4.775°로 정의되어 있다. 블레이드 단면의 형상의 경우 S809 Airfoil로 구성되어 있으며 Tower의 축 부분 및 모터 부위의 해석은 생략하였다 또한 이 풍력터빈은 20kW의 정격출력을 발생시키며 회전속도는 72 rpm이며, 블레이드의 표면거칠기는 고려하지 않았다

### 2.2 블레이드의 비틀림각

이 논문에서 비교할 Phase VI 블레이드의 경우 실제 비틀림각이 Fig. 2와 같이 제작되어 있다. 기존의 Airfoil의 비틀림각의 경우 Span station에 따라 곡선의 분포를 가지고 있으며 1차 선형직선으로 비틀림각을 고려한 경우는 기존의 형상에 대하여 S809 Airfoil 영역의 첫 부분과 끝 부분의 비틀림각을 기준으로 선형직선으로 제작하였다

풍력터빈의 블레이드에 작용하는 양력과 항력의 경우 그 성능에 큰 영향을 미친다. 양력과 항력의 경우 여러 변수 중에 특히 유체의 밀도, 유체의 흐름속도, 블레이드의 크기, 형상 및 방향과 관련이 있다

기존 형상에 대하여 임의로 비틀림각을 고려하게 되면 유동방향에 수직인 면에 투영되는 면적인 정면도면(Frontal area)이 변하게 된다. 그러나 1차 선형직선으로 비틀림각을 고

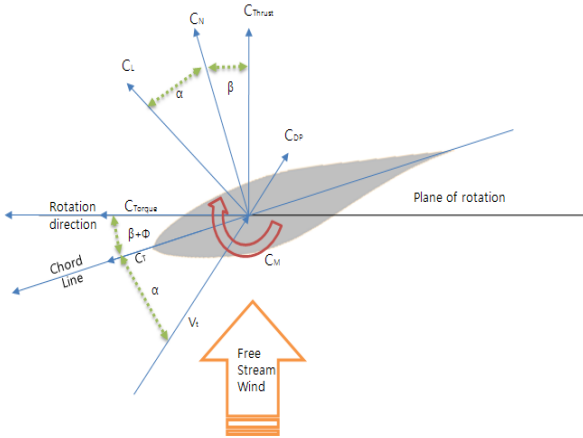


Fig. 3 Forces on the blade.

려한 경우는 기존 형상에 대한 정면도 면적과 같다이로써 정면도면적에 대해서는 양력과 항력이 변하지는 않을 것으로 예측된다. 또한 일정한 흐름 중에 놓여진 블레이드는 힘을 받지만, 그 힘의 방향은 일반적으로 일정한 흐름과 평행하지 않다.

Fig. 3은 블레이드에 작용하는 힘으로써 실제 방향은 양력과 항력의 크기에 의존하고 있다 이를 고려하여 각각의 항력과 양력을 비교해 보는 것은 블레이드의 성능을 예측함에 있어서 중요한 요소가 된다

Fig. 3에서 사용된 변수는 다음과 같다

$\beta$	-	Blade Pitch angle
$\Phi$	-	Local twist angle
$\alpha$	-	Angle of attack
$C_N$	-	Normal force coefficient
$C_T$	-	Tangent force coefficient
$C_L$	-	Lift force coefficient
$C_{DP}$	-	Pressure drag force coefficient
$C_{Thrust}$	-	Thrust coefficient
$C_{Torque}$	-	Torque coefficient
$C_M$	-	Pitch moment coefficient
$V_t$	-	Resultant velocity vector

### 2.3 블레이드의 비틀림각

비틀림 각은 블레이드의 각 섹션별 익형이 회전자의 반지름에 따라서 최적의 양력계수를 가질 수 있도록 정의하며 다음의 공식을 따른다[6].

$$\theta_{Twist} = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{R}{r \cdot TSR_{opt}}\right) - \theta_{Airfoil} \quad (1)$$

여기서  $\theta_{Airfoil}$ 은 해당 익형이 가지는 양력계수에서 받은 각이며,  $TSR_{opt}$ 는  $C_{P,max}$ (Power coefficient)일때의 TSR이며, R은 블레이드의 전체 반지름이며 r은 Span station에 따른 회전자의 반지름이다

풍력발전에서 사용되는 블레이드의 비틀림각은 이러한 이론을 바탕으로 설계되어지는데 Span station에 따라 비선형적인 값으로 변하게 된다 이는 BEMT이론의 경우 몇 가지 가정을 전제하고 있지만 실제로 구배법 최적설계법 역설계기법을 각각 적용하여도 거의 같은 결과를 얻을 수 있다

### 2.4 지배방정식

연속방정식과 Navier-stokes 방정식을 유차원 지배방정식으로 사용하였다 식 (2)은 연속방정식이며, 식 (3)은 운동량 방정식이다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + g_i \quad (3)$$

위 식은 직교좌표계에서 Tensor notation으로 표기하였으며 여기서 사용된 변수는 다음과 같다

$x_i$	-	Cartisian coordinates (i=1,2,3)	[m]
$u_i$	-	Velocity of flow in $x_i$ direction	[m/s]
$t$	-	Time	[s]
$\rho$	-	Density	[kg/m <sup>3</sup> ]
p	-	Pressure of a fluid	[Pa]
$\nu$	-	Kinematic viscosity	[m <sup>2</sup> /s]
$g_i$	-	Gravity	[m/s]

전체 유동장에 의한 마하수의 경우 비교적 낮은 회전속도와 자유류를 고려하였을 때 비압축성이며 온도에 대한 항은 풀지 않아도 되기 때문에 온도장에 대한 에너지방정식은 생략하였다.

### 2.5 난류모델

Navier-stokes 방정식을 사용하여 난류모델에 대하여 전산 해석을 하기 위해서는 난류 운동을 구성하는 미소스케일의 와운동의 해상을 충분한 격자점을 확보해야 하기 때문에 많



은 시간과 기술이 요구된다 또한 현재 컴퓨터의 성능이 아무리 발달하였다고 하지만 와동의 최소스케일을 해상할 수 있는 모든 미세격자를 고려하는 기술까지는 큰 무리가 있다 그러므로 현재의 전산해석 방법으로서 난류를 해석하기 위해서는 난류모델의 도입이 필요하며 그에 따라 발생된 미지수를 구하기 위해 모델링이 필요하다

이 논문에서는 여러 가지 난류 모델 가운데 2차 유동에 있어 비교적 정확한 예측을 하는 것으로 알려진 Two-equation 모델에서 난류전단응력(Turbulent shear stress) 수송항을 계산하는  $k-\omega$  SST 모델을 사용하였다 이 모델의 경우 난류모델을 적용한 해석 결과가 유동장을 완전난류로 가정함에 있어서는 단점이 있지만 역 압력구배에 의해 발생하는 와류의 크기와 박리점을 비교적 정확히 예측할 수 있다

Turbulent viscosity 모델은 다음과 같다[7].

$$\mu_t = \rho \nu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega^* F_2)} \quad (4)$$

식 (3)은 와점성(eddy viscosity  $\mu_t$ )를 나타내며,  $a_1$ 은 0.31,  $\Omega^*$ 은 strain rate,  $F_2$ 는 Blending function이다.

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4)$$

$$\arg_1 = \min\left[\max\left(\frac{k^{0.5}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{w2}^w CD_{kw} y^2}\right] \quad (5)$$

$$CD_{kw} = \max\left(\frac{2\rho}{\omega\sigma_{w2}^w} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20}\right)$$

Blending function은 난류모델의 성공을 위해 매우 중요한 요소이며, 이 방정식의 형태는 표면과의 가장 가까운 거리와 유동 변수를 기반으로 한다 여기서,  $y$ 는 벽면으로부터 가장 가까운 곳까지의 거리를 의미한다

$$\alpha_1 = \frac{\beta_1}{\beta_1^*} - \frac{1}{\sigma_{w1}^w} \frac{\kappa^2}{\sqrt{\beta_1}} \quad (6)$$

식 (5)에서 사용된 coefficients는 다음과 같다.

$\sigma_{k1}^w$	$\sigma_{w1}^w$	$\beta_1$	$\beta_1^*$	$\kappa$
1.176	2.0	0.075	0.09	0.41

$$\alpha_2 = \frac{\beta_2}{\beta_2^*} - \frac{1}{\sigma_{w2}^w} \frac{\kappa^2}{\sqrt{\beta_2}} \quad (7)$$

식(6)에서 사용된 coefficients는 아래와 같다.

$\sigma_{k2}^w$	$\sigma_{w2}^w$	$\beta_2$	$\beta_2^*$	$\kappa$
1.0	1.168	0.0828	0.09	0.41

이 연구에서 구하고자 하는 변수는 각방향의 속도압력이며 적절한 함수 및 계수를 적용하여 해석을 수행하였다

위 방정식들을 고려하여 구하고자 하는 변수인 각 방향의 속도, 압력, 난류 등에 대하여 적절한 계수를 사용하여 계산을 수행하였다

## 2.6 전산해석 방법

회전하는 블레이드에 대한 전산해석은 두 가지 기법에 의해서 처리된다. 첫 번째는 다좌표계법(MRF, Multiple reference frame method)으로서 여러 개의 서로 다른 좌표계들을 이용하여 블레이드의 회전을 고려하는 방법으로서 그 가운데에서도 Implicit MRF 방법과 Explicit MRF 방법으로 나뉜다[8].

Implicit MRF 방법은 회전속도가 다른 두 영역이 격자로 연결되어 있는 형태로 Implicit의 특성상 2개 이상의 passage를 사용하는 전산해석 방법이다. Explicit MRF 방법은 회전영역의 연결부에서 격자가 일치하지 않아 Frame 간의 격자를 명시적으로 연결해주고 경계조건을 서로 일치시켜주는 방법이다. 다좌표계법의 경우 유동장을 정상상태로 가정하여 전산해석을 수행하는 방법으로서 일반적으로 유동장의 근사적인 값이 요구되는 경우에 사용되며 이동격자계법에 비해 해석 시간이 비교적 짧다는 특징을 갖는다

두 번째는 이동격자법(SM, Sliding mesh method)이다. 이는 격자간의 실제 이동을 통해 비정상 유동으로 가정하여 해석을 수행하는 방법으로서 회전 영역과 비회전 영역으로 구분하여 해석을 수행하는 방법이다 이는 격자가 이동하는 동안 경계면의 격자를 임의의 각도로 회전영역의 격자를 이동시키는 방법으로서 서로 독립적인 격자 공간이 상대속도를 가지고 이동하는 현상을 해석하는 방법으로서 실제 문제와 가장 유사한 조건으로 해석을 할 수 있으나 다좌표계법에 비해 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다

Table 1은 다좌표계법과 이동격자계법에 대한 계산 시간 및 격자수를 나타내었다 각각의 격자수는 격자의존도 결과를 바탕으로 가장 적절한 격자수를 선정하였으며 이동격자계법의 경우 실제로 격자가 이동을 하기 때문에 회전영역과 비회전영역의 경계를 조밀하게 해야 하므로 격자수가 많아져 계

Table 1 Comparison of results for MRF and SM.

Numerical Method	Calculation Time(h)	Number of Mesh(Million)
MRF	25	2.0
SM	174(8 Revolution)	3.2

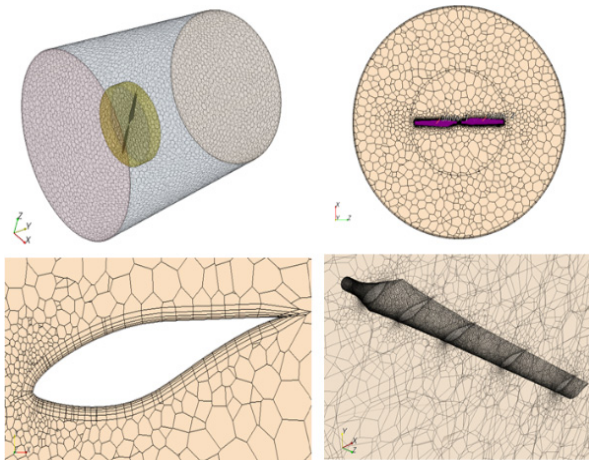


Fig. 4 Grid of systems.

산에 소요되는 시간이 증가하였다

### 2.7 격자 생성 및 계산조건

Phase IV 블레이드 형상의 경우 각 단면에 대하여 Chord의 길이 및 비틀림각(Twist angle)의 변화가 심하다 이를 고려하여 주어진 데이터를 바탕으로 CATIA V5를 이용하여 블레이드 및 계산 영역을 설정하였다

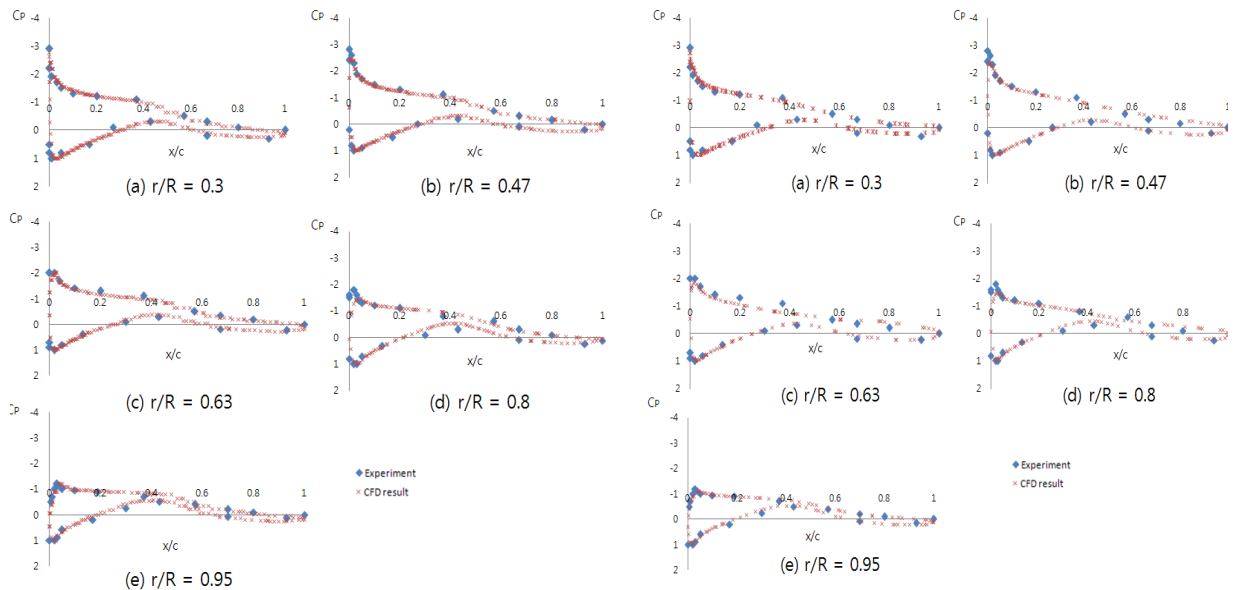
블레이드 전면의 경우 일정 풍속을 가지는 자유류 조건인 Velocity inlet, 블레이드 후면의 경우 일정 압력의 Pressure outlet을 설정하였다

Outwall의 경우 실제 블레이드에 작용하는 바람이 자유류 (Free stream)이기 때문에 No-slip condition을 적용하게 되면 점성의 효과로 인하여 블레이드에 균일한 흐름을 생성할 수 없기 때문에 Slip-condition으로 조건을 설정하였다

회전영역에는 약 90만개, 비회전영역에는 약 110만개의 Polyhedral mesh를 생성하였으며, 전산해석 상용코드로는 STAR-CCM+ Version 3.04을 사용하였다 또한, 블레이드 주변에는 유동 변화가 클것으로 예상이 되며 경계층 유동을 계산하기 위해서 6개의 Boundary layer를 사용하여 회전영역의 계산을 수행하였다 또한 수정된 모델에 대해서도 기존모델과 같이 동일한 격자 및 격자수가 되도록 생성하였다

격자의 개수 경우 적절한 유동장을 표현하기 위해서 최대 320만 개를 생성하였으며 위와 동일한 방법으로 전산해석을 수행하였다. Inlet에서 들어오는 공기의 속도는 7 m/s로서, 블레이드는 시계방향으로 72 rpm으로 회전한다. 계산은 본 연구실에서 보유하고 있는 PC(64Bit, Code-core, 3GHz, 32GB RAM)에서 이루어졌다

이동격자계법을 사용 시 블레이드의 회전에 대해서는 시간



(a) Result of  $C_p$  using MRF method

(b) Result of  $C_p$  using Sliding mesh method

Fig. 5 Reliable verification for pressure coefficients.

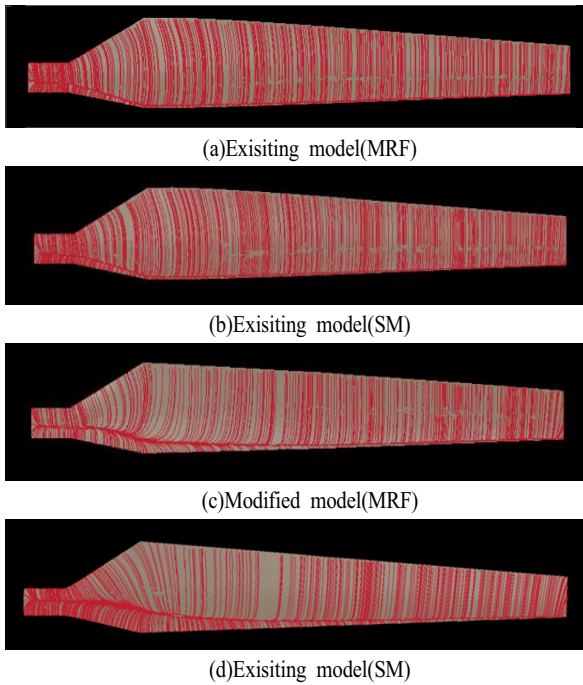


Fig. 6 Surface streamlines on blade for wind speeds.

간격(time-step)마다 1° 회전에 따른 계산 수행을 위하여 약 0.00231(s)을 적용하였다 Fig. 4는 전체 격자의 모습과 블레이드 주변의 Boundary layers를 나타내고 있다

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 상용코드에 대한 신뢰성 검토

Fig. 5는 자유류의 흐름 속도가 7 m/s 일 때 블레이드의 스펀위치에 대하여 시위를 따라 측정된NREL[9]의 풍동 실험값과 이 연구에서 사용된 상용코드의 압력계수(Pressure coefficient)를 비교한 결과를 나타낸다

Fig. 3 (a)의 경우는 다좌표계법을 사용한 결과이며Fig. 3 (b)의 경우는 이동격자계법을 사용한 결과로서 90회전 후의 결과로서 압력계수에 대한 식은 다음과 같다

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 + (\Omega r)^2} \quad (8)$$

위 식(8)에서  $P_\infty$ 는 자유류의 압력,  $\rho_\infty$ 는 Density,  $V_\infty$ 는 자유류의 풍속,  $\Omega$ 는 블레이드 각속도이며  $r$ 은 스펀방향으로의 길이를 의미한다[9].

이 결과를 통해서 실험값과 전산해석 값이 잘 일치함을 확

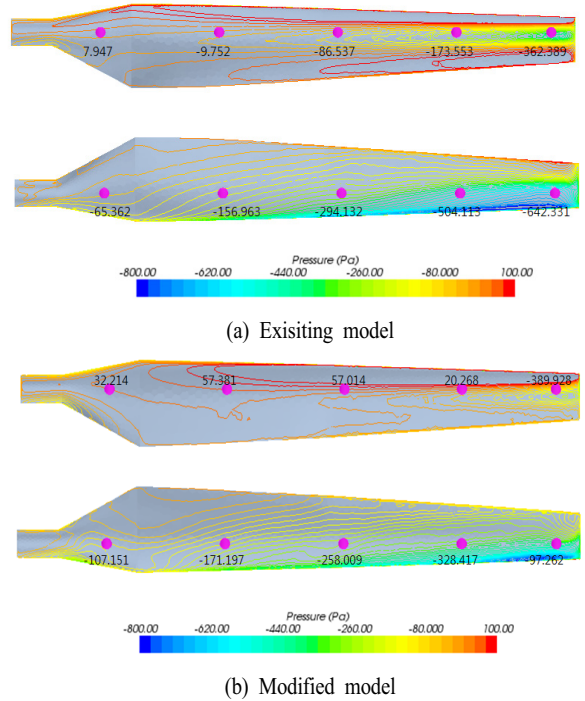


Fig. 7 Gauge pressure on blade surfaces.

인할 수가 있었다 특히, 다좌표계법과 이동격자계법을 서로 비교해 보았을 때 정량적인 결과에 있어서도 큰 차이가 없음을 확인 할 수 있었다

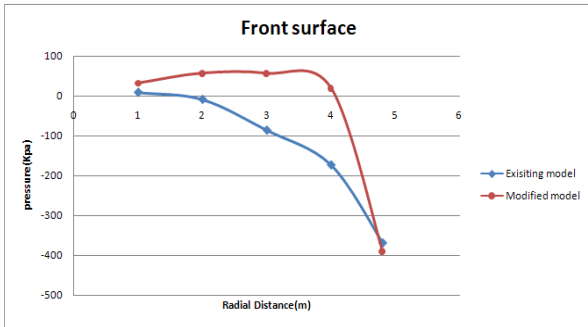
압력계수의 결과에 대한 전체적인 경향에서 약간의 오차가 발생함을 확인할 수가 있다 이는 전산해석 상의 오차로 간주할 수 있다. 이 연구의 유동장의 경우 층류 천이, 난류 영역이 모두 공존함에도 불구하고 전산해석의 특성상 천이영역을 고려할 수 없으므로, 전체 유동장을 난류로 가정하였으며 난류 모델인 k- $\omega$  SST를 사용하여 층류 및 천이영역에서 발생할 수 있는 유동장 해석에서도 난류방정식을 사용하였기 때문에 그에 수반되는 오차로 판단된다

#### 3.2 표면유선(Surface streamline)에 대한 비교

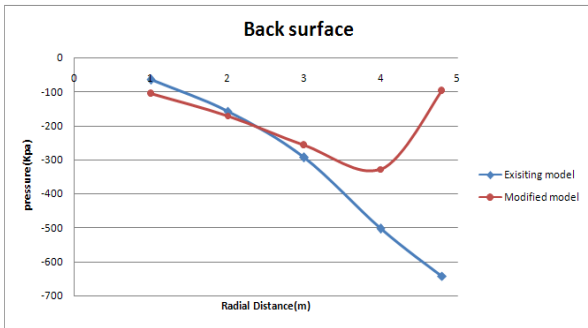
Fig. 6는 블레이드의 표면유선(Surface streamline)으로서 (a)와 (b)는 기존 형상에 대하여 다좌표계법과 이동격자계법을 이용한 결과이며 (c)와 (d)는 비틀림각을 1차 선형직선으로 고려한 결과에 대한 다좌표계법과 이동격자계법을 이용한 결과이다.

기존 형상에 대한 표면유선의 결과를 비교하면Transition 영역에서 다좌표계법과 이동격자계법에 대하여 그 차이가 존재하지만 부분적인 박리점이나 전면적으로 실속이 발생하는





(a) Pressure for front surface



(b) Pressure for back surface

Fig. 8 Pressure for radial distance on blade surfaces.

등과 같은 현상은 발생되지 않는다는 것을 확인할 수 있다 즉, 블레이드 표면의 압력계수나 공력하중을 예측함에 있어 이는 큰 차이가 없을 정도의 오차로 무시할 수 있다

본 모델에 대한 여러 논문의 전산해석의 결과에서도 확인하였듯이, 난류모델 상용코드 및 격자수에 따라서 약간의 차이가 존재하기는 하나 설계 풍속인 7 m/s에서 대부분 부착 흐름(Attached flow)이 형성되었음을 확인하였다

비틀림각을 선형적으로 고려한(c)와 (d)의 결과를 보면 기존 형상과 비교하였을 때 정체점이 전면에서 뒷면으로 약간 상승하는 경향을 보였다 그러나 이러한 차이에도 불구하고 전체적인 경향은 대체적으로 안정적인 부착흐름이 형성되었다고 판단되어진다

다좌표계법과 이동격자계법의 계산결과를 비교해 보았을 때 큰 차이가 없음을 확인할 수가 있었으며 이 연구에서는 계산시간의 결과를 고려하였을 때 다좌표계법을 이용하는 것이 더 효율적인 것이다

### 3.3 블레이드 표면의 압력 비교

이 연구에서는 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)에 바탕을 둔 k- $\omega$  SST 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였다

Fig. 7 (a)의 결과는 블레이드 표면에 작용하는 압력의 등압선으로서 이를 Nilay[1]의 LES(Large Eddy Simulation)을 이용한 블레이드에 작용하는 압력분포와 비교해 보면 서로 잘 일치함을 확인 할 수 있다 일반적으로 LES를 사용한 난류유동 예측이 정확도면에서 더 신뢰성이 있다고 알려졌지만 (a)의 결과를 통해 SST K- $\omega$  모델을 사용한 난류유동 예측 또한 큰 오차 없이 잘 일치함을 확인하였다

수정된 모델에서 블레이드의 앞단과 뒷단에서 압력차이가 크게 작용하는 것을 확인 할 수가 있다 또한 기존의 모델의 경우 중심축을 기준으로 Span의 위치에 따라서 1m, 2m, 3m, 4m, 4.8m에 대한 압력의 분포를 Fig. 8에 나타내었으며 중심축에서 끝단으로 갈수록 압력이 감소하는 것을 확인 할 수가 있다. 압력구배에 있어서 수정된 모델은 기존 모델에 비해 Span의 끝단에서 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있으며 블레이드의 뒷면에서는 Span의 끝단 부분에서 오히려 압력이 증가하는 것을 확인하였다

## 4. 결 론

이 연구에서는 상용코드인 STAR-CCM+ Version 3.06를 이용하여 NREL에서 실험한 phase VI 모델에 대하여 비틀림각을 선형으로 고려한 블레이드에 대한 유동 해석 결과를 기존 블레이드와 비교한 연구 결과로서 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) National Renewable Energy Laboratory(NREL)에서 수행한 Phase VI 모델에 대한 풍동실험의 결과를 바탕으로 전산해석을 이용하여 압력계수(Pressure coefficient)를 비교하였으며, 그 경향이 일치함을 확인하였다
- 2) 회전하는 물체에 대한 전산해석 방법으로서 다좌표계법(MRF, Multiple Reference Frame Method)과 이동격자계법(SM, Sliding Mesh Method)을 사용하였으며 두 결과를 비교 및 검토하였을 때 큰 차이가 없음을 확인하였으며 계산 시간 및 경제성등을 고려하면 이 연구의 경우 다좌표계법을 사용하는 것이 더 효율적임을 확인하였다
- 3) 표면유선을 비교한 결과를 통해 블레이드에 정체점이 발생하는 위치가 차이가 나는 것을 확인하였다
- 4) 블레이드 표면에 작용하는 압력에 대하여 기존의 형상과 수정된 형상에 대하여 압력 분포를 비교하였으며 그 끝단에서의 압력차이를 확인하였다
- 5) 현재까지의 연구 진행과정을 기초로 하여 향후 비틀림각의 차이에 대한 정량적인 성능곡선을 계산하고 다양한 풍속에 대한 데이터를 비교하고 압력분포의 차이에 대하여 이론적인 해석이 수행되어야 할 것이다



## 후 기

이 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신  
인력양성사업으로 수행된 연구결과이며 이에 감사드립니다

## 참고문헌

- [1] 2006, Sezer-Uzol, N., "3-D Time-Accurate CFD Simulations of Wind Turbine Rotor Flow Fields," *AIAA Paper No.2006-0394, Presented at AIAA Aerospace Science Meeting.*
- [2] 2009, Rados, K.G., "CFD modeling issues of wind turbine wakes under stable atmospheric conditions," *EU project UPWIND, # SES6 019945.*
- [3] 2007, Wubou, S., "3-D simulation of the turbulent wake behind a wind turbines," *Journal of physics conference, series 75.*
- [4] 2009, Takao, M., "Experimental study of a straight-blade vertical axis wind turbine with a directed guide vane row," *Proceedings of the ASME.*
- [5] 2008, Kang, T.J., "Aerodynamic Analysis of the NREL Phase VI Rotor using the CFD," *KSAS, pp. 315-320.*
- [6] 2005, Bossanyi, E.A., "GH Bladed Theory Manual," Garrad Hassan and Pantners Ltd.
- [7] 2006, *STAR-CD:version 4.00 Methodology, CD-adapco.*
- [8] 2009, Lee, M.-S., "The Performance Analysis of A CWP Pump for Nuclear Power Plant," *KSCFE Vol.14 Issue 3, pp.69-75.*
- [9] 2001, Simms, D., Schreck, S., Hand, M. and Fingersh, L.J., "NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements," *Technical report for the National Renewable Energy Laboratory, TP-500-29494.*
- [10] 2008, Martin, O.L.Hansen, "Aerodynamics of Wind Turbines," *Earthscan pp.112-117.*
- [11] 2009, 황병선, *최신 풍력 터빈의 이해*, 출판사 아진
- [12] 2008, Kim, T.S., Lee, C., Son, C.H. and Joh, C.Y., "Rotating Flow Analysis around a HAWT Rotor Blade Using RANS Equations," *KSCFE, Vol.13 Issue 2, pp.69-75.*