



J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 47(3), 177-186(2019)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.3.177

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

수직축 풍력터빈 성능향상을 위한 풍력타워 최적설계에 관한 연구

조수용¹, 임채환², 조종현³

Optimum Design of a Wind Power Tower to Augment Performance of Vertical Axis Wind Turbine

Soo-Yong Cho¹, Chae Hwan Rim² and Chong-Hyun Cho³

Dept. of Aerospace Engr. (ReCAPT), Gyeongsang National University¹

Dept. of Aero Mechanical Engr, Kyungwoon University²

Technology R&D Center, Suntech LtD.³

ABSTRACT

Wind power tower has been used to augment the performance of VAWT (Vertical Axis Wind Turbine). However, inappropriately designed wind power tower could reduce the performance of VAWT. Hence, an optimization study was conducted on a wind power tower. Six design variables were selected, such as the outer radius and the inner radius of the guide wall, the adoption of the splitter, the inner radius of the splitter, the number of the guide wall and the circumferential angle. For the objective function, the periodic averaged torque obtained at the VAWT was selected. In the optimization, Design of Experiment (DOE), Genetic Algorithm (GA), and Artificial Neural Network (ANN) have been applied in order to avoid a localized optimized result. The ANN has been continuously improved after finishing the optimization process at each generation. The performance of the VAWT was improved more than twice when it operated within the optimized wind power tower compared to that obtained at a standalone.

초 록

풍력 타워는 수직형 풍력터빈의 성능을 향상시키기 위해 사용되어왔다. 하지만 올바르게 설계되지 않은 풍력 타워는 오히려 풍력터빈의 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 풍력 타워의 최적화 연구를 수행하였다. 이를 위하여 다음과 같이 6가지의 설계변수가 선택되었다. 즉, 가이드 벽의 외부 및 내부 반경, 스플리터의 적용 여부, 스플리터의 내부 반경, 가이드 벽의 개수 및 원주각도가 선정되었다. 최적화를 위한 목적함수는 풍력타워 내에 설치된 수직형 풍력터빈에서의 주기적인 평균 토크가 사용되었으며, 최적화 과정에서 지엽적인 최적화 결과를 피하기 위하여 실험계획법, 유전자알고리즘 및 인공신경망기법이 사용되었다. 인공신경망은 세대의 증가에 따라 지속적으로 향상하였으며, 수직 풍력터빈의 성능은 독립운전에 비하여 최적화된 풍력 타워 내에서 두 배 이상 향상되었다.

Key Words : Optimization(최적화), Wind Power Tower(풍력타워), Vertical Axis Wind Turbine (수직형 풍력터빈), Performance Augment(성능향상)

† Received : January 1, 2019 Revised : February 25, 2019 Accepted : March 1, 2019

¹ Professor, ² Professor, ³ Principal Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : sycho@gnu.ac.kr

© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

1. 서 론

지구온난화의 문제로 화석연료의 사용을 저감하기 위한 방안으로 재생에너지의 개발은 상당히 중요하여졌다. 이를 위하여 태양열, 풍력, 해양 등 다양한 에너지원으로부터 전력을 얻고자 하는 많은 연구가 시도되고 있다. 특히 풍력의 경우 높은 적용성으로 매년 설치 영역이 확대되면서 재생에너지 분야에서 영향력이 증대되고 있다. 풍력발전을 위한 터빈은 수평축이나 수직축 외에도 다양한 종류의 풍력터빈이 사용되고 있으며, 출력 또한 크기에 따라 아주 다양하다.

특히, 본 연구에 적용되는 수직축 풍력터빈의 경우 수평축에 비하여 요(yaw)장치가 필요 없으므로 비교적 간단한 구조로 제작될 수 있으며, 아울러 발전기를 낮은 위치에 설치할 수 있는 장점 등이 있으므로 도심에서도 쉽게 볼 수 있다. 하지만 터빈 블레이드가 풍향에 대하여 최대 출력을 얻기 위한 상태를 유지하는 것이 아니면서, 풍향과는 수직하게 설치되어져 회전을 하므로 뒤따르는 블레이드는 앞선 블레이드에서 형성된 와류의 영향을 받게 되어 출력 저하가 발생된다. 또한 풍향에 대한 블레이드의 방향조정이 안되므로 초기 기동 시에 상대적으로 큰 토크를 필요로 한다. 이로 인하여 풍속이 크지 않은 경우에는 낮은 성능특성을 보인다.

높은 출력을 얻기 위하여서는 당연히 풍력터빈을 높은 풍속이 형성되는 지역에 설치하면 되겠지만, 풍속은 지리적 및 환경적 요인에 의하여 좌우된다. 따라서, 동일한 지리적 조건에서 형성되는 풍속으로부터 얼마나 효율적으로 풍력에너지를 기계적인 에너지로 변환하는가 하는 것이 풍력터빈 성능에 핵심적인 문제이다. 따라서 풍력터빈 성능을 향상하기 위한 가장 기본적인 연구로 풍력터빈 블레이드에 대한 연구[1-3]가 많이 수행되었다.

수직축 풍력터빈의 출력 향상을 위하여 여러 방법들이 시도되었는데, 수직축에서는 통상 터빈블레이드가 중력 방향으로 설치되어, 회전하므로 풍향에 따른 성능의 영향은 없다. 하지만 회전 위치에 따라 블레이드에서의 받음각이 달라지기 때문에 순간적인 출력은 블레이드의 위치에 따라 달라진다. 따라서 이러한 점을 고려하여 블레이드에서 출력을 향상할 수 있는 받음각을 형성하도록 풍력터빈 앞부분에 안내베인[4,5]을 설치하여 성능을 향상하는 연구들이 수행되었다. 하지만 안내베인을 풍향에 맞도록 조정하여야 하는 추가적인 장치가 필요하다.

풍속은 풍력터빈의 출력에 가장 큰 영향을 미치므로 이를 증가하기 위한 연구도 수행되었는데, 이를 위하여 풍력터빈 출구에 확산관을 설치하는 것이다. 확산관의 설치로 풍력터빈 출구에 낮은 압력이 형성되므로 풍력터빈 전후에 압력차가 증가하여 풍력터



Fig. 1. View of wind power tower with VAWTs

빈에 더 많은 에너지가 들어가게 되어 출력 증대 [6,7]를 하게 된다. 하지만, 수직축 풍력터빈의 경우에는 수직축을 기준으로 회전운동을 하므로 풍력터빈의 출구에 확산관을 설치하는 것은 용이하지 않다. 따라서 풍력터빈의 외부에 집풍관 구조를 만들고 그 구조물의 중심에 풍력터빈을 설치하여 보다 많은 에너지와 받음각의 향상으로 성능향상을 하고자 하는 연구가 수행[8,9]되었다. 이 외에도 풍력터빈의 위치를 높이던가, 건물간의 중간영역에서 형성되는 높은 풍속을 이용하던가, 높은 위치에 집풍관을 설치하는 등의 방법[10]들이 적용되고 있다. 이상과 같이 다양한 방법으로 풍력터빈의 성능을 향상하는 연구들이 수행되고 있다.

본 연구에서는 수직축 풍력터빈의 성능향상을 위한 방안으로 사용되는 풍력타워에 관한 연구를 수행하였다. 풍력타워는 집풍관으로 사용되며, 요장치가 필요 없어 간단하면서도 수직축 풍력터빈의 작동조건을 향상할 수 있다. Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 풍력타워를 고층으로 설치하면 풍력터빈의 작동 위치를 높일 수 있는 장점이 있을 뿐만 아니라 풍력타워의 층수마다 풍력터빈을 설치할 수 있는 장점이 있다. 이러한 풍력타워를 기존의 건물에 연계하여 설치하는 경우에는 성능향상과 함께, 공간의 효율성, 미적인 부분까지도 증대하게 되므로 설치비용 대비 경제성이 있음을 보여주었다[11]. 하지만 풍력타워는 유동방향에 능동적인 대처를 하지 못하므로 풍력타워의 설계변수를 잘못 선정하였을 경우에는 풍향에 따라서 오히려 풍력타워 내에 설치된 풍력터빈의 출력감소가 발생할 수 있다[12]. 그러므로 본 연구에서는 풍력타워 내에 설치된 수직축 풍력터빈에서 최고의 성능이 얻어지도록 풍력타워의 형상에 관한 최적화 연구를 수행하였다.

II. 최적화

2.1 풍력타워 설계변수 선정

풍력타워는 여러 층으로 형성되나, 각 층에서의 형상은 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 동일하다. 본 연구에서는 층수에 대한 영향을 무시하고 유동은 풍력타워의 상하바닥면에 평행하다고 가정한다. Fig. 3은 풍력타워의 최적화를 위한 설계변수들을 수평단면에서 보여주고 있다. 그림에서는 단순히 7개의 안내벽과 스피리터가 적용된 경우의 형상을 보여주고 있다.

풍력타워는 수직축 풍력터빈의 성능을 향상하기 위한 장치이므로, 크기는 풍력타워 내에 설치되는 수직축 풍력터빈의 크기에 따라 좌우된다. 따라서 풍력터빈의 회전반경(R_w)이 가장 기준이 되는 치수가 된다. 풍력타워 바깥부분의 크기는 외부반경(R_o)에 의하여 정하여지고, 안내벽이나 스피리터의 바깥부분도 풍력타워의 바깥부분에 일치되어 설치된다. 따라서 안내벽이나 스피리터의 길이는 외부반경(R_o) 대비 각각의 내부반경(R_i, R_{si})에 의하여 결정된다. 그 외에도 안내벽의 두께나 높이 등이 있으나 안내벽의 두께는 전체 크기에 비하여 아주 미소하므로, 이것이 수직축 풍력터빈의 성능에 미치는 영향은 미미하다. 풍력터빈의 높이는 풍력터빈의 출력이 높이에 비례한다고 하면 안내벽의 높이는 풍력터빈의 형상비(aspect ratio)에 의하여 결정된다. 따라서 풍력터빈의 회전반경이 결정되면 풍력타워의 크기와 관련한 설계변수는 안내벽의 외경 및 내경, 스피리터의 내경(R_o, R_i, R_{si})으로 선정할 수 있다.

유동과 관련한 최적화 설계변수로는 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 풍향과 안내벽에 의하여 형성되는 원주각(β)이 필요하다. 이 설계변수는 비록 풍력타워의 구조와는 관련이 없을지라도 풍력타워의 성능과 관련이 있다. 단독형으로 작동하는 수직축 풍력터빈

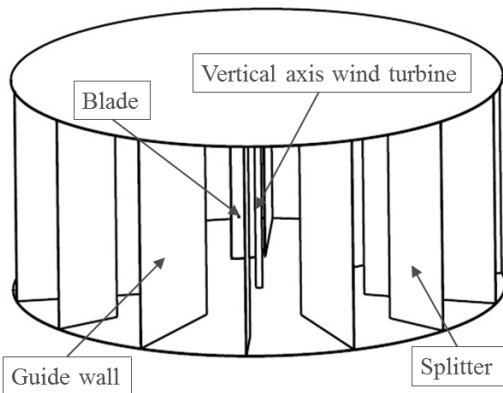


Fig. 2. Configuration of wind power tower with a VAWT

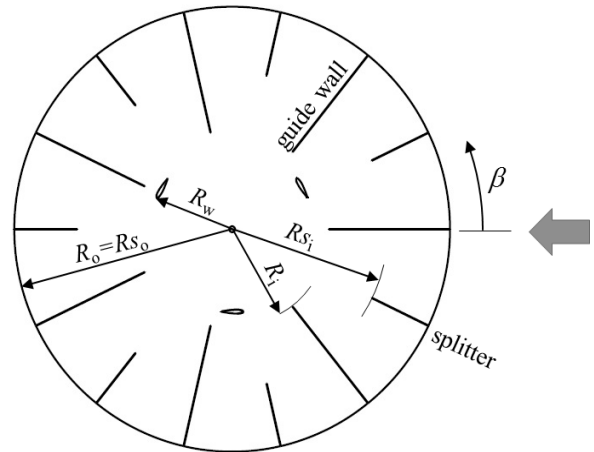


Fig. 3. Design variables of wind power tower with a VAWT

은 풍향과는 관련이 없지만, 풍력타워에 설치되는 경우에는 안내벽과 풍향과의 상대적인 위치에 따라서 수직축 풍력터빈의 성능이 달라지기 때문이다. 원주각은 안내벽과 풍향이 Fig. 3에서처럼 일치하는 경우를 0° 로 설정한다. 만일 풍향이 안내벽의 한 피치 각도까지 증가하면 원주각은 다시 0° 가 된다. 한 피치의 각도는 안내벽의 개수에 따라 달라지므로 안내벽의 개수(Z)도 최적화를 위한 설계변수가 된다. 또한 안내벽의 개수가 적은 경우에는 스피리터가 풍력타워내에서 유동의 변동을 줄여줄 수 있는 효과가 있으나, 안내벽의 개수가 많은 경우에는 유동의 흐름을 방해할 수 있으므로 스피리터의 적용유무(Y)도 설계변수가 된다. 따라서 앞서 풍력타워의 크기와 관련한 3개의 설계변수와 유동과 관련한 3개의 설계변수 (β, Z, Y)를 포함하여 총 6개의 설계변수가 선정되었다.

2.2 설계변수의 영역제한

최적화의 수행에서 설계변수의 영역을 물리적으로 문제가 없도록 설정할 필요가 있다. Table 1은 설계변수의 최대 및 최소의 범위를 보여주고 있다. 첫 번째로 안내벽의 개수(Z)는 실험[12]이나 계산의 결과 [13]에서 6, 7개가 효과적이었으므로 최소 5개, 최대 8개로 설정하였다. 안내벽의 내부 반경(R_i)은 풍력터빈의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 풍력터빈의 회전반경(R_w)과의 간격을 결정하게 된다. 따라서 안내벽의 내경이 줄어들어 풍력터빈에 근접하더라도 풍력터빈 블레이드의 작동에는 문제가 없도록 최소값을 설정하였으며, 안내벽의 내경(R_i)이 증대하여 풍력터빈에서 멀어지면 풍력터빈의 받음각에 미치는 영향이 미미하게 되므로 이를 기준으로 최대값을 설정하였다.

안내벽의 외부반경(R_o)은 증대하면 풍력터빈의 성

Table 1. Constraints of design variables

design variables	initial	minimum	maximum
Z	7	5	8
$e_i = \frac{R_i - R_w}{R_w}$	0.2	0.12	0.5
$e_o = \frac{R_o}{R_w}$	2.8	2.0	3.1
$e_s = \frac{R_{si}}{R_w}$	2.2	Eq. (1)	Eq. (2)
Y	yes	no	yes
β	0	0	360/ Z

능은 나아지겠지만 그 크기에 비례하여 무한히 증대하는 것이 아니고 $R_o/R_w = 3.0$ 이상에서는 그 영향이 아주 약하여지므로[18] 그 이상의 크기로 정하는 것은 수직축 풍력터빈에서의 출력 향상으로 인한 효과와 풍력터빈의 설치비용과의 관계를 고려하여 결정할 문제이다. 본 연구의 최적화에서는 회전반경의 3.1배로 외부반경의 최대값으로 설정하였다.

스프리트에서 내부반경(R_{si})의 최소값은 안내벽 길이를 기준으로 식 (1)과 같이 안내벽의 내부반경(R_i)에서 안내벽 길이의 20%의 범위로 하고 최대값은 스프리트의 역할을 할 수 있도록 식 (2)에서처럼 안내벽의 내부반경을 기준으로 안내벽 길이의 80%의 범위로 설정하였다. 최적화에서 스프리트의 적용여부(Y)는 on-off의 기능으로 설정하였다. 원주각(β)은 설정된 안내벽의 개수에서 360° 기준으로 한 피치의 각도를 최대값으로 설정하였다.

$$e_{s \min} = \frac{(R_o - R_i) \times 0.2 + R_w}{R_w} \quad (1)$$

$$e_{s \max} = \frac{(R_o - R_i) \times 0.8 + R_w}{R_w} \quad (2)$$

2.3 목적 함수

풍력터빈의 설계변수 설정값에 따라 풍력터빈의 형상은 달라지지만, 이 때 찾고자 하는 목적함수는 수직축 풍력터빈의 성능이 된다. 통상 풍력터빈의 성능은 식 (3)과 같이 출력계수(C_p)로부터 비교평가가 가능하다.

$$C_p = \frac{\tau [N.m] \times \Omega [RPM] \times 2\pi/60}{0.5 \rho V_\infty^3 A} \quad (3)$$

식 (3)의 분자항은 출력을 의미하는데 토크(τ)와 각속도의 곱으로 나타나 있다. 반면에 분모는 풍력터빈

의 전면면적(A)에 대한 상류에서의 바람에너지를 나타내고 있다. 풍력터빈의 최적화에 있어서 설계변수의 변경에 따라, 풍력터빈의 회전수나 크기가 변경되는 것은 아니지만, 풍력터빈은 설계변수인 외경에 따라서 크기가 변경되어진다. 따라서 풍력터빈의 크기가 증대하면, 유동의 흐름에 저항하는 면적이 증대하므로 상류의 유동은 풍력터빈에 가까이 가면서 전압력의 변동은 없을지라도 정압력은 증대하게 되고 풍속은 감소하게 된다. 이로 인하여 바람에너지의 값은 풍력터빈에서 무한 상류의 위치가 아니라면 계산되어지는 위치에 따라 미소한 차이를 보일 수 있다. 이러한 문제점의 해소를 위하여 충분히 큰 계산영역을 설정할 수도 있겠지만, 이러한 방식은 엄청난 계산시간을 초래한다. 본 연구에서는 풍력터빈에서 충분히 떨어진 하류의 출구조건을 동일한 정압력으로 설정하고, 회전위치에 따라 얻어진 토크값으로부터 주기에 대하여 평균한 토크(τ)를 목적함수로 설정하였다. 이러한 설정은 무한 상류에서의 입구조건을 사용하는 것과 동일하다고 할 것이다.

2.4 최적화 기법

목적함수가 최대가 되도록 하는 설계변수를 찾는 방법은 여러 가지가 있다. 가장 빠른 방법으로 기울기 기반의 최적화 기법이 있지만, 이 방법은 설계변수의 변화에 대하여 목적함수의 변동이 비선형적인 영향을 적게 받는다면 양호한 초기값을 설정하여 최적화를 수행할 수 있다. 하지만 풍력터빈의 형상변화에 대하여 토크의 변화에 비선형적인 요소가 강하므로 기울기 기반의 적용은 지엽적인 최적화의 결과를 얻게 된다. 이를 피하기 위하여서는 반응표면법[14,15]이나 유전자알고리즘[16,17]과 같은 방법을 적용하여야 한다. 하지만 이들 방법의 적용은 설계변수의 개수에 따라서 많은 계산시간을 요하기 때문에 두 방법을 혼합한 방법[18,19]을 적용하기도 하며 인공신경망(ANN)기법과 유전자알고리즘(GA)을 혼합한 방법[20]을 사용하기도 한다. 그 외에도 실험계획법(DOE)[21]으로도 지엽적인 최적화 문제를 피할 수 있지만, 결과에 비선형성이 강한 경우에는 DOE로 얻은 최종결과와 실제결과 사이에 차이가 발생할 수 있다. 하지만 이 방법에서는 설계변수의 주효과나 설계변수간의 교호작용 등에 대한 정보를 미리 확인할 수 있는 장점이 있다.

여러 최적화 방법에서 본 연구의 풍력터빈 최적화에서는 계산결과의 비선형성으로 인한 지엽적인 최적화결과를 피하면서 계산시간의 단축을 위하여, DOE와 GA를 사용하면서 ANN을 기본으로 하여 최적화를 수행하였다. 이러한 최적화 과정을 Fig. 4에서 보여주고 있다. 초기에 설정된 설계변수와 Table 1에서 보여주는 최대최소범위를 바탕으로 DOE를 수행하여 설계변수의 분포를 구한다. 다음으로, DOE에서 얻어

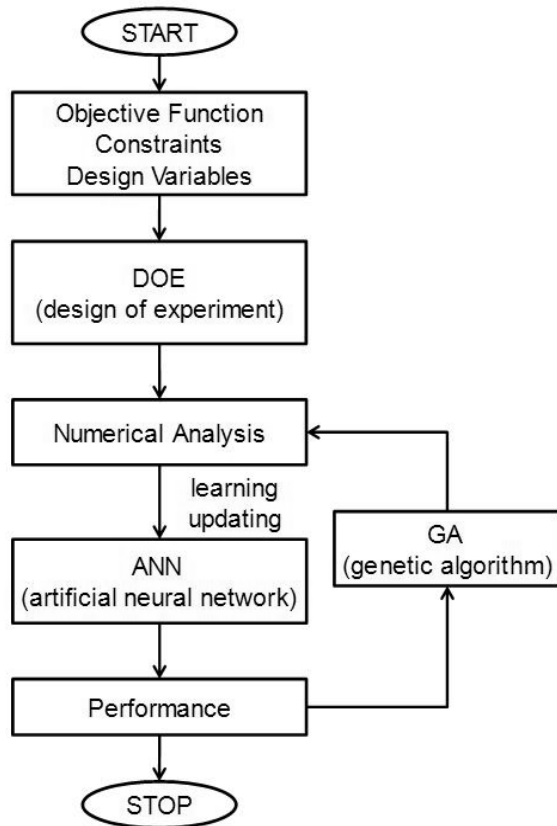


Fig. 4. Flow chart of optimization

진 설계변수들에 대하여 전산유체역학기법(CFD)을 사용하여 목적함수들의 값을 구한다. 이렇게 구한 설계변수와 목적함수를 사용하여 초기의 ANN을 형성한다. 다음 단계에서는 설계변수의 영역범위를 기준으로 GA를 적용하여 새로운 설계변수들을 분포하고, 이를 ANN에 적용하여 얻어지는 목적함수의 결과가 앞서 얻어진 목적함수의 최대값에 가까운 값(우성의 결과)을 나타내는 경우에 대하여서는 보다 정밀한 계산인 CFD를 수행한다. 이러한 결과들의 세트는 ANN의 입력으로 추가되어 ANN의 정확도를 향상한다. Fig. 4의 진행과정에서 보여주는 것처럼 동일한 방법으로 다음 세대에 대한 설계변수의 세트를 찾고, ANN을 지속적으로 향상한다. 최종적으로 ANN의 정확도가 충분히 향상될 때까지 반복수행하면서 최적값을 찾게 된다.

GA의 적용에서 각 세대(generation)별 개수(population)는 100개로 설정하였으며 다음 세대로 진입하는 엘리트 개수는 2로 설정하고, 교배 비율(Crossover fraction)은 0.8로 설정하였다. 돌연변이(Mutation)는 앞선 세대 결과를 바탕으로 적응하는 방향으로 제한 조건을 만족하도록 무작위로 설정하였다. ANN은 역전파알고리즘(back propagation algorithm)을 적용하였으며 은닉층과 출력층의 뉴런은 각각 기본적으로

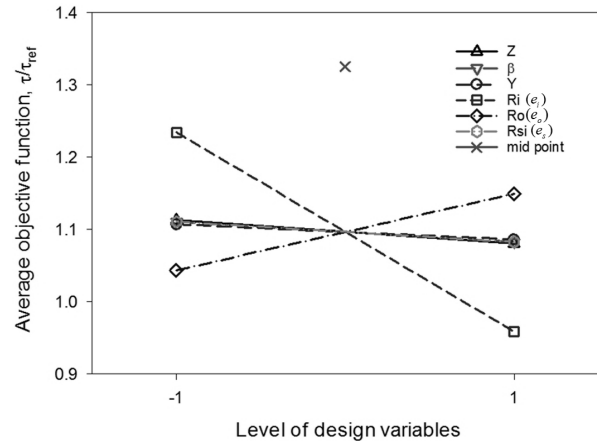


Fig. 5. Main effect of design variables

10개와 2개를 사용하였다. 하지만 세대가 진행되면서 은닉층을 40개까지 증대하였다. 전달함수는 은닉층에는 hyperbolic tangent 함수를 사용하였으며, 출력층은 직선함수를 적용하였다. ANN이 주어진 결과와 일치하도록 하기 위하여 가중치와 바이어스는 Levenberg-Marquardt[22,23] 알고리즘을 적용하여 얻었으며, ANN의 형성은 MATLAB[24]의 nftool을 사용하였다.

초기의 ANN을 형성하기 위한 DOE는 2^{6-1} 의 일부실험법(Fractional factorial design)을 사용하였으며 중간점을 포함하게 되면 33개의 설계변수에 대한 CFD의 결과를 필요로 하게 된다. 본 연구에서 초기 ANN의 정밀성을 향상하기 위하여 DOE를 위한 범위를 외부반경은 $R_o/R_w = 3.0$ 으로 설정하고, 스프리터 내부반경의 최대값도 축소하여 $R_i = (R_o - R_i) \times 0.7 + R_w$ 으로 설정하고, 원주각도 최대값의 90%까지 설정하였다. 초기 ANN이 형성된 후에는 설계변수의 전 영역을 바탕으로 최적화를 수행하였다.

Figure 5는 DOE에서 얻어진 설계변수 분포로부터 CFD를 수행하여 얻어진 목적함수를 바탕으로 설계변수의 변화에 따른 무차원화된 평균목적함수의 주효과를 보여주고 있다. τ_{ref} 는 단독형 풍력터빈에서의 토크이다. 주효과의 결과에서 설계변수 중에서 내부반경의 변화에 대하여 평균목적함수의 변화가 가장 크게 나타남을 보여주고 있다. 모든 경우에 중심점에서의 평균목적함수가 가장 크게 나타남으로 내부반경뿐만 아니라 안내벽의 개수에 의한 영향도 고려하여야 함을 알 수 있다.

III. 수치해석

3.1 수치해석방법

목적함수인 풍력터빈의 토크를 얻기 위하여서는 회전하고 있는 상태에서의 비정상(transient) 계산을

수행하여야 한다. 풍속과 격자특성길이를 기준으로 비정상해석의 시간간격이 설정되는데, 본 연구에서는 회전속도를 기준으로 1°의 회전각도를 기준으로 시간간격을 설정하였다. 비정상해석의 결과가 회전주기에 대하여 평균한 결과값이 수렴된 결과를 얻기 위하여 16회전의 결과에서 평균주기토크(τ)를 식 (4)와 같이 구하였다.

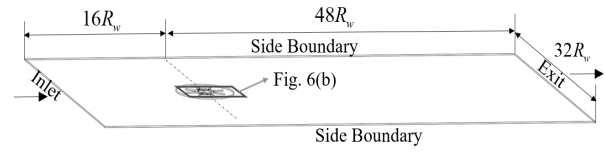
$$\tau = \frac{\sum_{\theta=1}^{360} \left[\frac{H}{\Delta l} \left(\sum_{i=1}^3 \tau_i \right) \right]_{\theta}}{360} \quad (4)$$

식 (4)에서 H 와 Δl 은 수직축풍력터빈의 실제높이와 계산에서의 높이를 의미하며, τ_i 는 계산에서 얻어진 블레이드에서의 토크이며 블레이드 개수만큼 합하여야진다. 주기에 대한 평균토크는 회전각도를 1° 하였으므로 360개의 결과를 평균하여 얻어진다.

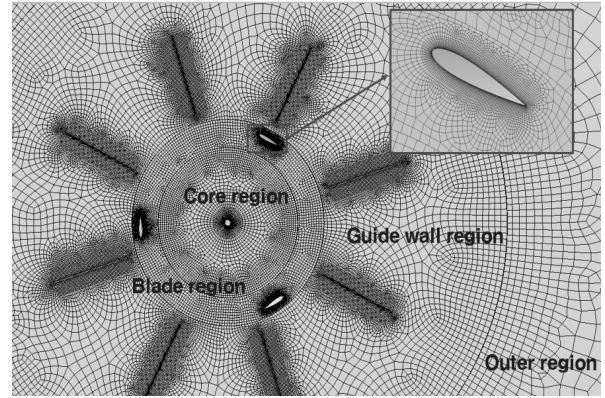
수치해석에는 상용코드인 CFX[25]를 사용하였으며, 대류항은 high resolution 을 사용하였다. 난류모델은 회전유동에 대하여 보다 정확한 결과를 보여주는 SST(shear stress transport)모델을 적용하고, 벽함수는 벽에서부터의 격자까지의 거리에 따라 자동으로 전환되어 계산되는 자동전환방식을 사용하였다. 비정상 해석에서 시간 증분기법은 2차 backward Euler 방법을 적용하였다. 계산 영역간의 접합면은 frozen 법을 적용하였다. 비정상해석을 수행하기에 앞서 계산결과와 빠른 안정화를 위하여 정상상태의 해석을 수행하고 이를 바탕으로 비정상해석을 수행하였다.

최적화를 위하여 설계변수의 변경에 따른 많은 계산이 필요하므로 식 (4)에서처럼 풍력터빈 블레이드 스패น(H) 중에서 일부분 높이(Δl)만을 선정하여 계산하는 2.5-D[26]해석 방식을 적용한다. 2.5-D의 해석이 2-D의 의한 해석보다는 실험결과와 더 일치하는 결과를 보여주고 있다. 하지만 실제 풍력터빈은 3-D에서 작동하는데 이를 축소하여 2.5-D의 해석을 하는 경우에 풍력터빈의 작동에 따라 발생하는 많은 물리적인 현상이 약화되거나 혹은 어떤 부분은 더 크게 나타날 수도 있다. 하지만 본 연구의 목적이 풍력터빈에 대한 연구가 아니고 풍력터빈의 최적화에 대한 연구이다. 따라서 2.5-D 방식을 적용하였음에도 속도비의 변경에 따른 출력계수의 결과가 실험에서 얻어진 결과와 동일하게 나타나는 일관성 있는 결과를 보이므로 이를 풍력터빈의 최적화에 적용하는 데는 문제가 없다.

계산영역은 4부분으로 설정하였으며, 내부영역, 블레이드영역, 안내벽영역, 외부영역으로 나누었다. Fig. 6은 스프리터 없이 8개의 안내벽이 적용된 경우에 대한 계산영역(a)과 격자(b)를 보여주고 있다. 블레이드영역과 내부영역은 회전영역이고, 나머지 영역은 고정되어 있다. 따라서 블레이드 영역은 안내벽영역과 만



(a) computational domain



(b) grid

Fig. 6. Computational domain and grid

나는 경계에서는 슬라이딩이 발생하는 면을 갖게 된다. 외부영역의 크기는 터빈회전축을 기준으로 $16R_w$ 만큼 유동의 상류에 설정하고, 후류의 영향이 최소화 되도록 $40R_w$ 만큼 하류에 설정하였다. 좌우로는 각각 $16R_w$ 가 되도록 하였다. 입구에서의 경계조건은 상대전압력이 40Pa 이 되도록 설정하였으며, 출구는 정압력의 조건을 사용하였다. 외부영역의 측면은 자유미끄럼(free slip) 조건을 사용하고, 스패방향으로는 아래부분은 대칭(symmetry) 조건을 적용하고 스패방향으로의 위부분은 자유미끄럼조건을 적용하였다.

3.2 최적화를 위한 작동조건

풍력터빈의 최적화를 위하여 풍력터빈의 회전수를 정하여야 한다. 회전수가 바뀌면 팁속도비(TSR: $R_w\omega/V_{\infty}$)가 바뀌게 되므로 상대적인 성능비교가 어려워진다. 따라서 우선 풍력터빈을 설치하지 않은 풍력터빈에서의 성능 선도를 계산하여야 한다. 이를 위하여 격자수에 따른 수렴성이나 기존 실험결과와의 비교를 통하여 수치해석의 기법에 대한 검정을 수행[27]한 결과 수치해석의 결과가 실험의 결과보다는 다소 좋은 결과를 보여주었으나 풍력터빈의 최적화를 위한 비교평가를 하는 데는 문제가 없음을 확인하였다. 풍력터빈에 설치되는 풍력터빈은 3개의 블레이드와 솔리디티(N_c/D_w)가 0.4이며, 익형은 NACA 0018이 적용되었다. Fig. 7은 풍력터빈 단독의 운전에서 얻어진 성능곡선을 보여주고 있다. 최고효율점은 TSR이 2.37인 경우에 얻어졌으므로 이때의 회전수를 기준으로 풍력터빈의 최적화를 수행하였다.

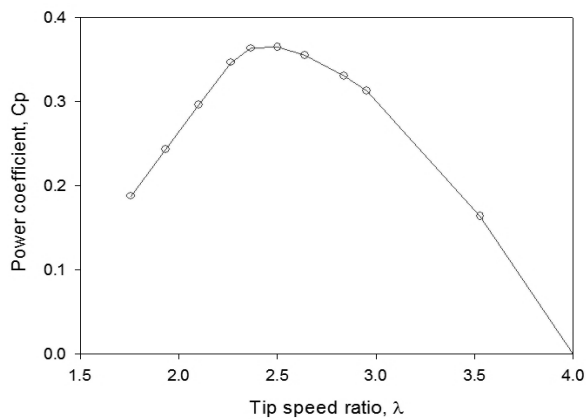


Fig. 7. Performance curve on a standalone VAWT

IV. 최적화결과

최적화의 과정에서 지속적으로 새로운 설계변수를 설정하는 GA에서 총 45세대(generation)까지 진행되었다. 이 과정에서 34세대 이후에는 앞서 계산되었던 결과보다 우성의 값이 나오지 않았으므로, ANN의 향상은 33세대에서 마지막으로 향상되었다. 최종적으로 총 395개의 CFD 결과가 ANN을 형성하였으며, 세대가 진행되면서 ANN이 향상되고 있는 결과를 Fig. 8에서 보여주고 있는데, 오차(δ)는 식 (5)에서 처럼 ANN에서 예측된 결과와 CFD로 재계산하여 얻어진 결과와의 차이를 나타내는 것이다.

$$Error[\delta] = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ANN_i - CFD_i)^2}}{n} \quad (5)$$

Table 2는 45세대를 진행한 후에 얻어진 상위 10개의 높은 성능을 나타내는 경우에 대한 최적화된 설

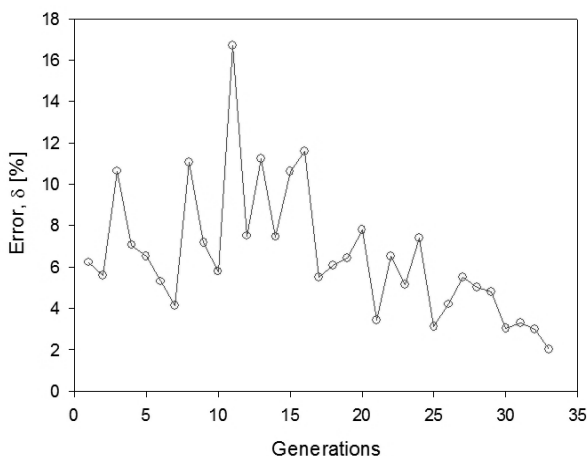


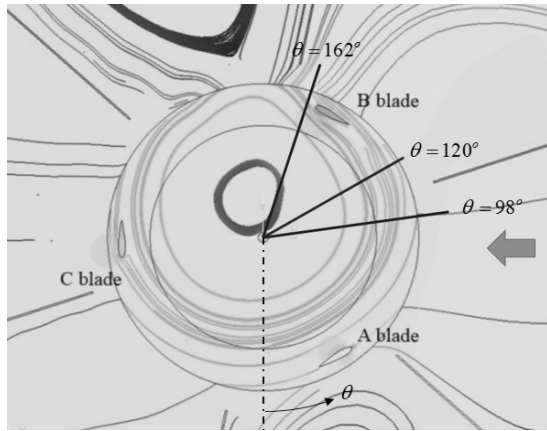
Fig. 8. Accuracy improvement of ANN

Table 2. Optimum design variables

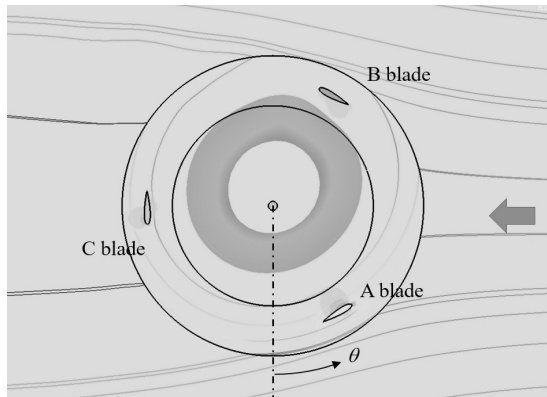
No	Z	$\frac{R_i - R_w}{R_w}$	$\frac{R_o}{R_w}$	β	C_p
1	6	0.268	3.024	18.7	0.759
2	6	0.268	3.056	21.1	0.753
3	6	0.232	2.856	21.8	0.750
4	6	0.228	2.936	20.9	0.750
5	6	0.268	3.056	21.1	0.747
6	6	0.2	2.876	19.8	0.743
7	5	0.144	2.932	17	0.741
8	5	0.148	2.932	17	0.737
9	6	0.26	3.076	22.8	0.735
10	6	0.156	2.884	17	0.730

계변수들의 값을 보여주고 있다. 모든 경우 스프리터 필요로 하지 않았으므로, 스프리터 내경에 대한 설계변수 값도 나타내지 않았다. 출력계수(C_p)가 0.759까지 큰 값을 보이는 것은 독립형의 경우와 비교를 위하여 식 (3)의 전면면적 적용에 풍력타워의 전면면적이 아닌 수직축 풍력터빈을 기준으로 하였기 때문이다. 따라서 출력계수는 풍력타워에 의하여 2배 이상으로 증대한 것이다. 최대출력이 얻어지는 풍력타워의 안내벽 개수(Z)는 6개의 경우가 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 원주각(β)은 안내벽 사이의 중간영역보다 약간 적은 값으로, 풍향에 대하여 안내벽이 이 원주각으로 유지될 때 풍력터빈의 출력이 가장 상승하게 된다. 따라서 최적화된 풍력타워를 설치하기 전에 반드시 설치하고자 하는 지역의 주 풍향을 고려하여 풍력타워가 설치되어야 우수한 효과를 발휘할 수 있게 됨을 알 수 있다.

최적화된 풍력타워에서 풍력터빈의 출력이 상승한 이유를 확인하고자 풍력타워 내에서의 유동장을 Fig. 9(a)에서처럼 유선으로 나타내었다. 특히, 터빈블레이드에 형성되는 받음각을 확인하기 위하여, 블레이드 주위로 형성되는 상대적인 유동으로 나타내었다. 아울러 풍력타워의 효과를 나타내기 위하여 Fig. 9(b)에서 풍력타워가 없이 동일한 조건에서 작동하는 경우에 블레이드에서 형성되는 받음각과의 차이를 알 수 있다. 블레이드 영역과 내부영역은 회전 좌표계를 사용하여 상대적인 유동장으로 표현한 것이다. Fig. 9(a)에서 회전각 $\theta = 58^\circ$ 와 $\theta = 118^\circ$ 의 위치에 있는 안내벽은 바람의 유입에 대하여 단면이 축소되도록 설치되어 있으므로 그 반대편 영역에서는 큰 와류가 형성되어지고 있다. 그 중에서 $\theta = 118^\circ$ 의 위치에 있는 안내벽에 의하여 형성된 와류는 주 유동의 흐름



(a) at optimized wind power tower

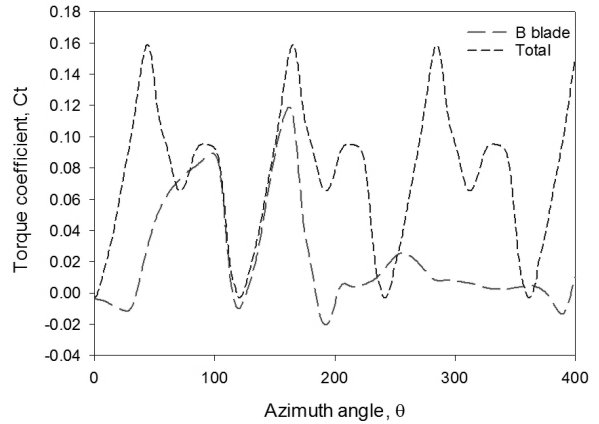


(b) standalone

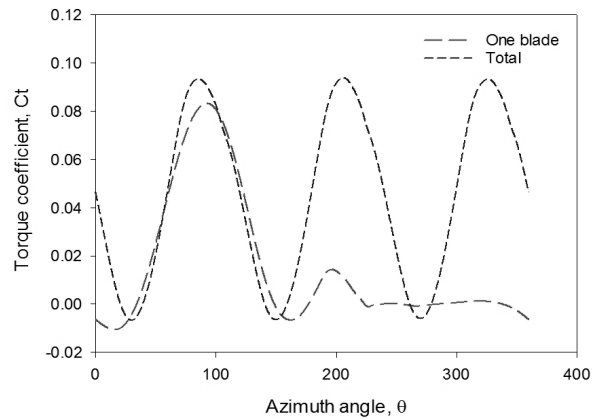
Fig. 9. Streamlines within the optimized wind power tower with a VAWT and at standalone

을 그림의 B 블레이드의 위치($\theta = 150^\circ$)에서 이 유동이 풍력터빈의 축방향으로 향하도록 하므로 이 위치를 지나는 터빈블레이드에 양호한 받음각이 형성될 수 있도록 하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 풍력타워가 없이 풍력터빈 단독으로 작동하는 경우에는 이 위치에서 아주 적은 받음각으로 낮은 토크를 형성하게 됨을 Fig. 9(b)에서 보여주고 있다. 회전 위치에 따른 보다 정확한 토크의 변동은 다음의 토크계수 선도로부터 알 수 있다.

Figure 10은 경우와 최적화된 풍력타워 내에 설치되었을 경우와 풍력터빈이 단독으로 운전되는 경우에 얻어지는 토크계수($C_t = \tau / (0.5 \rho A V^2)$)를 비교하여 나타내고 있다. 세 개의 블레이드가 사용되고 있지만 120° 의 회전각에 대하여 동일한 결과를 나타내므로 그 중 하나의 블레이드에 대하여 회전위치에 따른 토크계수의 변화와 세 개의 블레이드를 합한 총 토크계수를 비교하여 나타내고 있다. 풍력터빈 단독으로 운전되는 경우에는 블레이드에서 얻어지는 최대 토크의 위치는 회전각 $\theta = 90^\circ$ 전후에서 형성되어지



(a) VAWT within the wind power tower



(b) Standalone VAWT

Fig. 10. Torque coefficient on the blade of VAWT along azimuth direction

고 있다. 반면에 최적화된 풍력타워 내에서 작동하는 풍력터빈의 블레이드에서는 회전각 $\theta = 98^\circ$ 근처에서 높은 토크가 형성되었다가 $\theta = 120^\circ$ 의 위치에서는 안내벽 뒤에 형성된 와류로 인하여 낮은 토크가 형성되고 다시 $\theta = 162^\circ$ 전후의 회전각에서 큰 토크가 얻어졌다. 이 때 형성된 높은 토크가 전체 토크에 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 안내벽이 풍향에 대하여 원주각 $\beta = 18.7^\circ$ 로 설치되면서 최대 토크의 발생위치가 회전방향으로 이동되어졌으며 또한 토크 발생영역이 넓어졌으므로 출력의 상승을 가져왔다. 이러한 현상은 풍동에서 풍력타워를 회전하여, 원주각을 변경하면서 측정된 출력계수의 결과[12]와 일치함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 수직축 풍력터빈의 성능을 향상하기 위한 풍력타워의 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 6개의 설계변수를 선정하여 풍력터빈의 주기평균

토크가 최대가 되는 것을 목적함수로 하였다. 최적화에서 전역적인 최적화의 결과를 얻기 위하여 DOE, GA, ANN을 혼합한 방식을 적용하였으며, 최적화된 풍력타워에서는 스프리터의 적용이 필요 없다. 안내벽은 풍향에 대하여 약간의 원주각을 갖도록 설치하면, 토크를 형성하는 영역이 확대되며 토크가 증가함을 알 수 있었다. 최적화된 풍력타워의 적용으로 풍력터빈의 출력계수는 0.365에서 0.759까지 향상됨을 보여 주었다. 차후 실증 실험을 수행하여 최적화 결과를 보다 보완할 계획이다.

References

- 1) Timmer, W. A., and Rooij, R. P. J. O. M. V., "Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils," 2003, AIAA-2003-0352.
- 2) Grasso, F., "Hybrid Optimization for Wind Turbine Thick Airfoils," 2012, AIAA 2012-1354.
- 3) Schubel, P. J., and Crossley, R. J., "Wind Turbine Blade Design," *Energies*, No. 5, 2012, pp. 3425~3449.
- 4) Park, J., Lee, S., Sabourin, T., and Park, K., "A Novel Vertical Axis Wind Turbine for Distributed & Utility Deployment," 2007, Ontario Sustainable Energy Association
- 5) Takao, M., Maeda, T., Kamada, Y., Oki, M., and Kuma, H., "A Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine with a Directed Guide Vane Row," *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 3, No. 3, 2008, pp.379~386.
- 6) Isensee, G. M., and Abdul-Razzak, H., "Modeling and Analysis of Diffuser Augmented Wind Turbine," *International Journal of Energy Science*, Vol. 2, No. 3, 2012, pp.84~88
- 7) Phillips, D. G., Richards P. J., and Flay, R. G. J., "CFD Modelling and the Development of the Diffuser Augmented Wind Turbine," *Wind and Structures*, Vol. 5, 2002, pp.267~276.
- 8) Chong, W. T., Poh, S. C., Fazlizan, A., and Pan, K. C., "Vertical axis Wind Turbine with Omni-Directional-Guide-Vane for Urban High Rise Application," *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 19, 2012, pp.721~732.
- 9) Chen, L., Ponta, F. L., and Lago, L. I., "Perspectives on Innovative Concepts in Wind-Power Generation," *Energy for Sustainable Development*, Vol. 15, 2011, pp.398~410.
- 10) Allaei, D., and Andreopoulos, Y., "Invelox: Description of a New Concept in Wind Power and its Performance Evaluation," *Energy*, Vol. 69, 2014, pp.336~344.
- 11) Baek, Y. M., "Design of Guided Vane for Improving the Efficiency of a Vertically Layered Wind Turbine Generator," TR-2017, Odin Energy, 2017.
- 12) Cho, S. Y., Choi, S. K., Kim, J. K., and Cho, C. H., "An Experimental Study for Efficient Design Parameters of a Wind Power Tower," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 46, No. 2, 2018, pp.114~123.
- 13) Cho, S. Y., Rin, C., Choi, S. K., Kim, J. K., and Park, S. K., "Numerical Analysis on the Performance of Vertical Axis Wind Turbine Affected by the Configuration of the Wind Power Tower," *New Renew. Energy*, Vol. 11, No. 2, 2015, pp.17~28.
- 14) Wang, Z., Xi, G., and Wang, X., "Aerodynamics Design Optimization of Vaned Diffuser for Centrifugal Compressors Using Kriging Model," *Proceeding of Asian Joint Conference on Propulsion and Power*, China, Beijing, 2006, AJCPP2006-22023.
- 15) Shu, X., Gu, C., Xiao, J., and Gao, C., "Centrifugal Compressor Blade Optimization Based on Uniform Design and Genetic Algorithms," *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, Vol. 2, No. 4, 2008, pp.454~456.
- 16) Fan, H. Y., "An Inverse Design Method of Diffuser Blades by Genetic Algorithms," *Proceedings Institutes Mech. Engineering(A)*, Vol. 212, 1998, pp. 261~268.
- 17) Pierret, S., and Braembussche, R. A., "Turbomachinery Blade Design Using a Navier-Stokes Solver and Artificial Neural Network," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, 1999, pp.326~332.
- 18) Bonaiuti, D., Arnone, A., Ermini, M., and Baldassarre, L., "Analysis and Optimization of Transonic Centrifugal Compressor Impellers Using the Design of Experimental Technique," GT-2002-30619, 2002.
- 19) Bonaiuti, D., and Zangeneh, M., "On the Coupling of Inverse Design and Optimization Techniques for the Multi-objective, Multi-point Design of Turbomachinery Blades," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 131, 2009, 021014-1.
- 20) Verstraete, T., Alsalihi, Z., and Braembussche, R. A. V., "Multidisciplinary Optimization of a Radial Compressor for Microgas Turbine Applications," *Journal of Turbo-machinery*, Vol. 132,

2010, 031004-1.

21) Bonaiuti, D., Arone, A., Ermini, M., and Baldassarre, L., "Analysis and Optimization of Transonic Centrifugal Compressor Impellers Using the Design of Experiments Technique," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 128, 2006, pp.786~797.

22) Hagan, M. T., and Menhaj. M., "Training Feed-Forward Networks with the Marquardt Algorithm," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5, No. 6, 1999, pp.989~993.

23) Hagan, M. T., Demuth, H. B., and Beale, M. H., "Neural Network Design," Boston, MA: PWS Publishing, 1996.

24) Matlab R2013a, MathWorks, Inc.

25) CFX, v.17, 2017, ANSYS Inc.

26) Li, C., Zhu, S., Xu, Y. L., and Xiao, Y., "2.5-D Large Eddy Simulation of Vertical Axis Wind Turbine in Consideration of High Angle of Attack Flow," *Renewable Energy*, Vol. 51, 2013, pp. 317~330.

27) Cho, S. Y., Choi, S. K., Kim, J. K., and Cho, C. H., "Numerical Study to Investigate the Design Parameters of a Wind Tower to Improve the Performance of a Vertical-Axis Wind Turbine," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 12, 2017, pp.1~12.