

## 사보니우스 소형풍력터빈 수치해석용 격자시스템 평가

김철규<sup>1</sup> · 이상문<sup>1</sup> · 전석윤<sup>1,2</sup> · 윤준용<sup>2</sup> · 장춘만<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원, <sup>2</sup>한양대학교 대학원 기계공학과

## Evaluation of a Grid System for Numerical Analysis of a Small Savonius Wind Turbine

CHUL-KYU KIM<sup>1</sup>, SANG-MOON LEE<sup>1</sup>, SEOK-YUN JEON<sup>1,2</sup>,  
JOON-YONG YOON<sup>2</sup>, CHOON-MAN JANG<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Build Technology (Daehwa-Dong) 283, Goyandae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University (Sa-3-dong) 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15588, Korea

**Abstract** >> This paper presents the effect of a grid system on the performance of a small Savonius wind turbine installed side-by-side. Turbine performance is compared using three different grid systems; tetrahedral grid having a concentrated circular grid around turbine rotors, the tetrahedral grid having a concentrated rectangular grid around turbine rotors and the symmetric grid having a concentrated tetrahedral grid near the turbine rotor blades and a hexahedral grid. The commercial code, SC/Tetra has been used to solve the three-dimensional unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis in the present study. The Savonius turbine rotor has a rotational diameter of 0.226m and an aspect ratio of 1.0. The distance between neighboring rotor tips keeps the same length of the rotor diameter. The variations of pressure and power coefficient are compared with respect to blade rotational angles and rotating frequencies of the turbine blade. Throughout the comparisons of three grid systems, it is noted that the symmetric grid having a concentrated tetrahedral grid near the turbine rotor blades and a hexahedral grid has a stable performance compared to the other ones.

**Key words** : Wind turbine(풍력터빈), Small wind farm(소형 풍력 단지) Savonius turbine(사보니우스 터빈), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Grid system(격자계)

### Nomenclature

$V$  : wind speed, m/s  
 $D$  : rotor blade diameter, m  
 $P$  : pressure, Pa  
 $C_p$  : power coefficient

### 1. 서 론

풍력발전은 바람 에너지를 이용하여 블레이드를 회전을 시키고, 이를 전기에너지로 변환시키는 원리를 갖는다. 풍력에너지는 자연에서 얻는 무한에너지라는 장점이 있는 반면, 풍력터빈 설치를 위해서는 풍자원이 풍부해야 한다는 지리적 요인이 요구된다.

이와 함께 설치 및 운영 가능한 지역이어야 한다는 지형적 제한 조건을 가지고 있다. 최근 들어 여러

<sup>†</sup>Corresponding author : jangcm@kict.re.kr

Received: 2016.9.2 in revised form: 2016.10.4 Accepted: 2016.10.30

Copyright © 2016 KHNES

(a) Shore wind farm<sup>1)</sup>(b) Small wind farm<sup>2)</sup>

Fig. 1 Wind farms

대의 풍력터빈을 일정간격과 방향으로 배열하는 풍력단지에 관한 연구가 증가하고 있다.

풍력발전은 크게 대형 및 소형 풍력발전으로 대별할 수 있다. 또한 설치지역에 따라 육상 및 해상풍력으로 구별된다. 대형 풍력발전의 경우, 풍자원이 풍부한 산악지형이나 고원지대에 설치, 운영하는 육상 풍력발전과 도서지역 또는 해상 한가운데 설치되는 해상 풍력발전이 있다. 현재 국내에서 공급가능 잠재량은 육상 풍력발전이 3.6 GW, 해상 풍력발전이 8.8 GW이며, 2009년 기준으로 전력망에 연계되어 있는 상업용 풍력발전기의 누적 설비용량은 324 MW이다. 지역별 설치규모는 강원도가 150.44 MW(83기)로 가장 많은 보급량을 갖으며, 다음으로 경상북도가 102.36 MW(67기), 제주도가 77.54 MW(43기) 설치 운전되고 있어, 이 세지역이 국내 전체 보급량의 95%를 차지<sup>3)</sup>하고 있다. 현재 국내는 주로 육상 풍력발전 위주로 설치되고 있는 실정이다.

>> 한국수소 및 신에너지학회 논문집

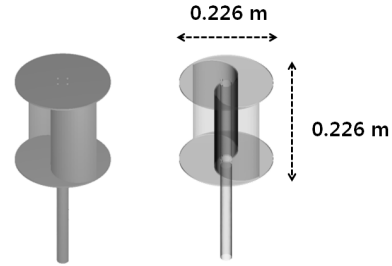


Fig. 2 Perspective view of a Savonius wind turbine rotor

최근 들어 평균 5 m/s 정도의 낮은 풍속조건에서도 경제적인 전력생산을 할 수 있는 소형 풍력터빈 단지조성 연구<sup>4,6)</sup>가 활발하게 진행되고 있다. 도서지역의 발전단가는 디젤발전을 기반으로 전기에너지를 생산하기에 육상발전에 비해 약 2~5배 높다. 이에 기존의 기저부하용 디젤 발전기를 대체할 목적으로 친환경 독립전원용 하이브리드 발전시스템에 대한 연구가 수행되고 있다. 하이브리드 발전시스템<sup>6)</sup>은 풍력, 태양광, 양수발전 및 에너지저장 시스템을 통합 연계하여 하나의 발전시스템으로 전력을 생산하는 시스템을 말한다. 이 때 풍력발전은 제작이 쉽고 신뢰성이 높은 다리우스(Darius) 또는 사보니우스형(Savonius) 소형 풍력터빈을 적용<sup>8-10)</sup>하고 있으며, 효과적인 풍력 에너지 이용을 위한 풍력단지 조성 계획<sup>11)</sup>을 연구하고 있다.

본 연구에서는 소형 풍력단지 조성을 위한 선행연구로 두 대의 사보니우스형 터빈이 나란히 위치했을 때를 고려하였으며, 풍력터빈 성능특성을 분석하기 위한 기초연구로 수치해석격자에 따른 제반 성능특성을 분석하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 해석영역

Fig. 2는 해석대상인 사보니우스 터빈의 형상을 나타낸다.

터빈 로터의 직경 및 높이는 각각 0.226 m 및 0.226

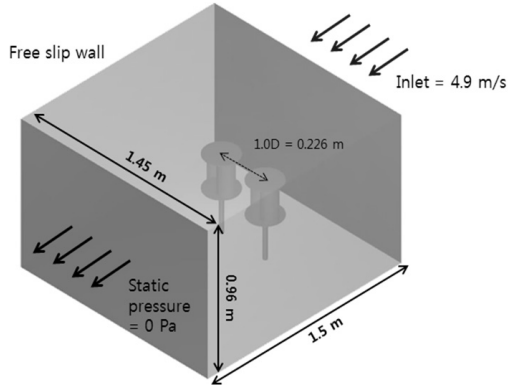


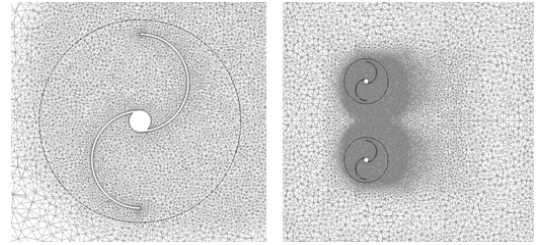
Fig. 3 Computational domain and boundary conditions

m이며, 로터의 종횡비는 1이다. 풍력 터빈 간격은 터빈로터의 직경과 동일하게 설정하였다. 이러한 배열은 풍력 단지에 적용되는 가장 기본적인 배열이다.

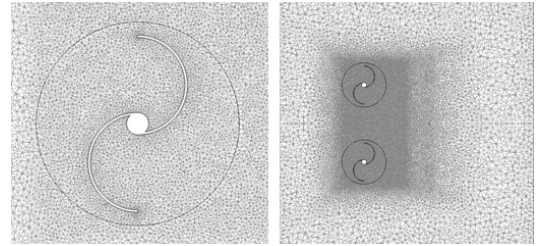
Fig. 3은 두 대의 사보니우스 풍력터빈을 수평으로 나란히 설치된 모습이며, 풍동실험조건과 동일하게 해석영역을 설정하였다. 풍동실험은 군산대학교에 설치되어 있는 풍력터빈 성능평가용 소형풍동시험장치에서 수행하였다. 소형풍동시험장치의 입구유속은 복수의 소형팬을 입구에 설치하여 조정하였으며, 시험부 단면 폭 및 높이는 각각 1.45 m 및 0.96 m이다. 시험장치의 공기흐름방향의 전체 길이는 1.5 m이다.

## 2.2 격자 시스템

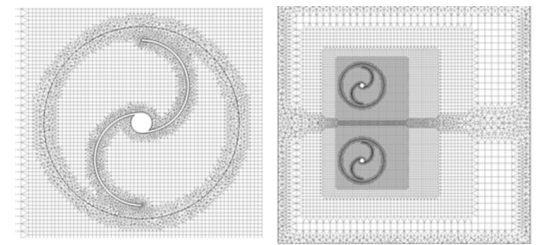
Fig. 4와 같이 본 연구에서는 세 종류의 격자시스템으로 수치해석에 따른 격자성능을 평가하였다. 첫 번째 격자는 사면체 격자를 기반으로 하고 터빈날개 주변을 원형으로 격자를 집중(tetrahedral grid having a concentrated circular grid around turbine rotors)하였으며, 두 번째 격자는 첫 번째와 같이 사면체 격자를 기반으로 하되 터빈날개 주변을 사각형으로 격자를 집중(tetrahedral grid having a concentrated rectangular grid around turbine rotors) 하였다. 세 번째 격자는 육면체 격자를 기반으로 터빈날개 주변을 사각



(a) tetrahedral grid having a concentrated circular grid around turbine rotors



(b) tetrahedral grid having a concentrated rectangular grid around turbine rotors



(c) symmetric grid having a concentrated tetrahedral grid near the turbine rotor blades and a hexahedral grid

Fig. 4 Grid systems for numerical simulation

형의 사면체 격자(symmetric grid having a concentrated tetrahedral grid near the turbine rotor blades and a hexahedral grid)로 구성하였다. 각각의 격자 시스템을 생성할 때 좌우가 대칭이 되도록 미러 카피 기법(mirror copy method)을 사용하였다. 첫 번째 격자는 격자생성 시간을 절약되며, 풍력터빈의 로터주변을 조밀하게 생성하였다. 두 번째 격자는 전체 해석 도메인을 사면체격자로 생성하되, 풍력터빈의 로터주변에 사각형의 영역을 추가로 구분하여 그 영역을 보다 조밀한 격자로 생성시켰다.

세 번째 격자는 풍력터빈의 로터주변을 조밀한 사각 격자로 생성하고 터빈에서 먼 영역 및 벽 근처는 프리즘 격자를 이용하여 생성하였다. 각각의 격자 시

**Table 1** Grid configuration with respect to grid systems

Grid Type	Discription	Number of Elements	RPM	TSR
1	tetrahedral grid having a concentrated circular grid around turbine rotors	7,396,294	250	0.6
2	tetrahedral grid having a concentrated rectangular grid around turbine rotors	8,162,240		
3	symmetric grid having a concentrated tetrahedral grid near the turbine rotor blades and a hexahedral grid	4,823,490		

시스템의 격자형태, 격자 수, 풍력터빈 운전조건 등에 대해 Table 1에 정리하였다.

### 2.3 해석방법 및 경계조건

본 연구는 풍력터빈의 격자 시스템의 영향을 비교하기 위해 상용 유동해석 프로그램인 SC/Tetra<sup>12)</sup>를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 또한 풍력터빈의 회전에 따른 터빈로터 주변의 유동장을 파악하기 위해 비정상 레이놀즈 평균 나비에-스톡스(unsteady Reynolds-averaged Navier- Stokes) 방정식을 적용하였다. 비정상 해석을 위한 Time step은 0.01s로 주었으며, Total time 0.1s(6회전)에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 3은 수치해석 영역을 나타내며, 입구경계조건으로 도서지역의 평균 풍속인 4.9 m/s를, 출구에서는 대기압을 각각 적용하였다. 상, 하면에는 free slip 조건을, 난류 모델은 SST k- $\omega$  모델을 각각 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 풍력 단지의 수직형 풍력터빈의 배열에 따른 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 선행 연구단계로 각 격자시스템에서 수치해석 결과에 미치는 영향을 고찰하였다.

기본적으로 두 대의 풍력터빈을 바람방향과 수직으로 나란히 배열했을 때로 가정하여 격자 시스템의

**Table 2** Comparisons of turbine performance with respect to grid types

Grid Type	Average Cp	Error Compared to Experiments
Experiments	0.108	-
1	0.098	9.2 %
2	0.10085	6.6 %
3	0.1093	1.2 %

영향을 비교하였다. 각 격자 시스템의 비교는 크게 회전각도에 따른 압력변화와 출력계수 등 두 가지의 해석결과를 이용하였다. 이 두 가지의 결과를 통하여 풍력터빈 배열에 가장 적절한 격자 시스템을 제안하였다. 압력변화는 풍력터빈의 mid-span의 경계면 90방향 한 포인트에서 고찰하였다.

### 3.1 격자형상에 따른 터빈성능검토

본 연구에서 검토한 세 종류의 계산격자를 이용하여 터빈성능을 두 대 사이의 평균 출력계수로 검토하였고, Table 2에서와 같이 실험값과 비교한 결과 세 번째 격자가 가장 실험값과 유사함을 알 수 있었다.

### 3.2 압력변화 비교

Fig. 5는 첫 번째 계산격자를 적용한 터빈의 회전각도에 따른 최대/최소 압력변화를 나타낸다. 첫 번째 계산격자를 적용한 경우 터빈의 회전에 따른 압력변화는 전 영역에 걸쳐 불일정한 사이클 곡선을 보인다. 최대 압력변화 패턴에서는 한 주기의 사이클에서 작은 피치를 이루는 불일정한 패턴들이 나타남을 확인하였다. 이와 같이 사면체 격자를 기반으로 하고 터빈날개 주변을 원형으로 격자를 집중시킨 첫 번째 계산격자 풍력 터빈의 배열을 해석하기에는 부적합하다고 사료된다.

Fig. 6 및 7은 두 번째 및 세 번째 계산격자 시스템에서의 회전각도에 따른 최대 및 최소 압력 변화를 나타낸다. Fig. 5의 첫 번째 격자와 비교했을 때, 두

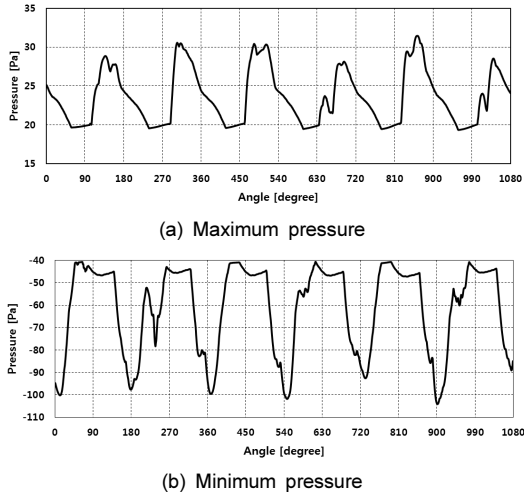


Fig. 5 Pressure variations for Type 1 grid system

번째 계산격자 시스템의 최대 압력변화는 유사하게 한 사이클의 변화에서 작은 피치를 발생하는 불안정한 변화를 나타내고, 최저 압력변화는 상대적으로 동일한 패턴의 곡선 피치 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 회전각도 180~360도 터빈 회전구간의 압력변화는 상대적으로 작은 피치를 나타낸다.

Fig. 7에서 나타난 바와 같이 세 번째 계산격자의 경우, 최대 및 최저 압력변화는 일정한 간격 및 동일한 패턴의 사이클 패턴을 보이고 있다. 따라서 풍력

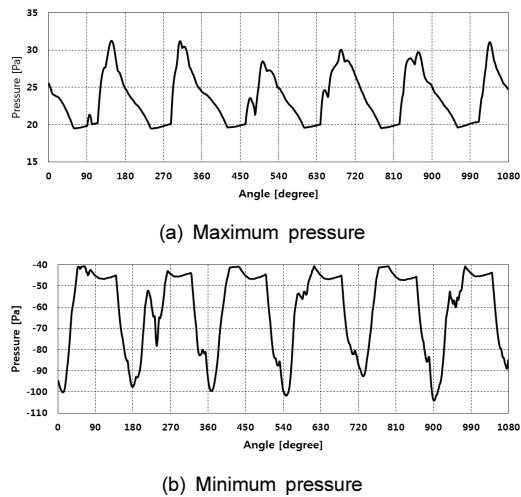


Fig. 6 Pressure variations for Type 2 grid system

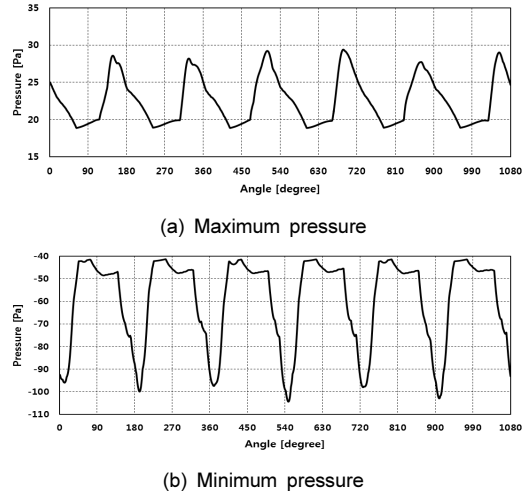


Fig. 7 Pressure variations for Type 3 grid system

터빈의 회전각도가 변화 하더라도 매우 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

### 3.3 출력계수 비교

Figs. 8~10은 각 격자 시스템에서 풍력터빈 날개가 4, 5, 6 회전 시의 회전각도에 따른 두 풍력 터빈의 출력계수 곡선을 보여준다. 이때 바람의 방향과 수직인 방향으로 나란히 설치되어 있으므로 각 터빈의 출력 계수 사이클이 일치된 위상 패턴을 보일수록 보다 신뢰성을 가진 해석 결과라고 볼 수 있다.

Fig. 8은 첫 번째 계산격자에 대한 출력계수 특성을 보여준다. 4회전 및 5회전 시 전반적으로 출력 계수가 불일치하는 것을 볼 수 있다. 5회전 시의 경우, 630~720도 사이의 구간에서는 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 6회전 시의 출력계수 특성은 4회전 및 5회전 시보다 상대적으로 잘 일치함을 보인다. 특히 회전각도 780~900도 구간에서 두 대의 풍력터빈의 출력계수가 잘 일치되는 것을 볼 수 있다. 그러나 전반적으로 불일치하는 구간이 많고, 회전 사이클에서의 곡선형태가 불안정하게 나타난다. 그리고 또한 특성 곡선 간의 불일치 시 그 폭이 크게 나타남을 확인할 수 있다.

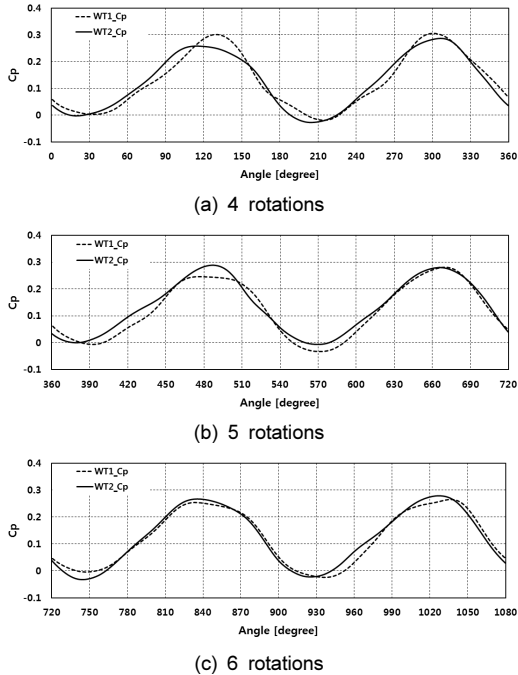


Fig. 8 Power coefficient for tetrahedral grid system

Fig. 9는 두 번째 격자시스템에서의 출력계수 특성을 나타낸다. 첫 번째 격자시스템에 비해 상대적으로 일치하는 구간이 많이 나타난다. Fig. 9(b)와 같이 5회전 시 두 대의 풍력터빈이 거의 일치하는 출력계수 곡선을 보이고 있어 Fig. 8과 같은 격자시스템의 출력특성곡선에 비해 상대적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다.

다시 말해 풍력터빈 로터가 5회전했을 때의 특성곡선은 390~720도의 전체적인 구간에서 위상이 잘 일치함을 보였다. 그러나 4회전 및 6회전 시 대부분의 영역에서 두 개의 출력계수 특성곡선이 불일치하는 것을 볼 수 있었으며, 사이클 패턴 또한 불안정한 곡선 형태로 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 수치해석 시 두 대의 풍력터빈을 일정한 간격으로 나란히 배열한 해석 도메인에서는 두 대의 터빈이 약 5~10% 정도의 출력계수 차이를 항상 염두에 두어야 한다.

Fig. 10은 세 번째 격자시스템의 출력계수 특성을

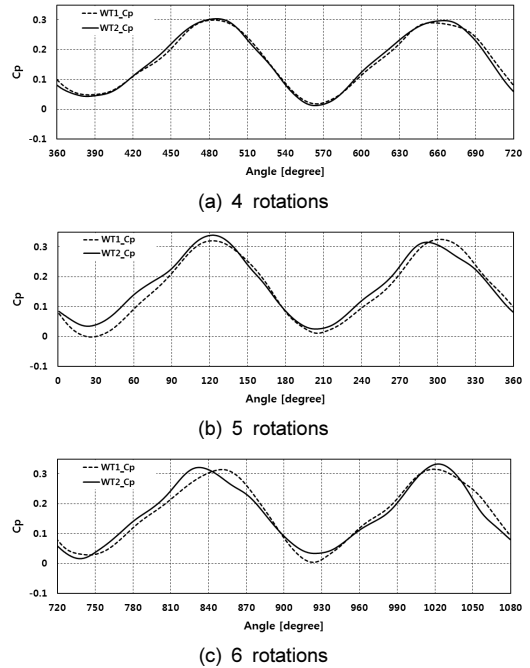


Fig. 9 Power coefficient for squared refine region tetrahedral grid system

나타낸다. 세 번째 격자시스템은 이전의 두 경우와 다르게 두 대의 풍력터빈의 출력계수 특성이 1~3% 이내로 잘 일치한다. 회전각도에 대한 위상 폭의 차이는 다소 보이지만 전체 회전 사이클에 따른 출력계수 특성곡선의 형태는 거의 일치하는 것으로 나타난다. 그리고 특성곡선의 형태 또한 사인곡선의 형태로 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 그러므로 수직축 풍력터빈의 경우, 두 대가 나란히 배열되어 있는 소형 풍력 단지에서 다수의 풍력 터빈의 영향을 수치해석을 통해 보고자 할 때, 세 번째 격자시스템을 적용한다면 보다 정확한 수치해석 결과를 얻을 수 있으며, 미리 카피 기법의 사용으로 격자생성 시간을 보다 줄인다면 보다 경제적인 해석을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구는 풍력 단지에서 풍력 터빈 간 배열에 따

른 성능에 미치는 영향을 평가하기 위한 선행 연구로서, 세 종류의 격자시스템을 적용하여 풍력터빈이 나란히 배열되어 있는 경우 수치해석을 통한 터빈 성능특성을 평가하였다. 최대 및 최소 압력변화 특성 및 출력계수 특성을 각 격자 시스템과 비교하여 소형 수직축 풍력터빈의 수치해석에 보다 적합한 격자 시스템을 제시하였다. 이러한 연구를 통해 바람방향과 수직이며, 나란히 배열된 풍력터빈의 수치해석을 수행 시 풍력터빈의 로터주변을 조밀한 사각 격자로 생성하고 터빈에서 먼 영역 및 벽 근처는 프리즘 격자를 이용하여 생성시킨 격자시스템이 가장 적합하며 적은 수의 격자 생성만으로도 신뢰성 있는 수치해석 결과를 도출할 수 있었다. 추후 풍력터빈의 다양한 배열에 따른 유동영향 연구를 통하여 소형 풍력 팜에서 보다 적합한 풍력터빈 배열을 찾는다면 소형풍력터빈도 보다 향상된 성능 및 경제성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 에너지기술평가원의 산업혁신기술사업 (Project No. 20153010130310)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. H. S. Oh, "사진으로 보는 태기산 풍력 발전소", <http://www.gwnews.org/news/articleView.html?dxno=14889>.
2. K. Matthias, M. Quinn and O. D. John, "Energy Exchange in an Array of Vertical-Axis Wind Turbines", *J. Turbulence*, Vol. 13, No. 38, 2012, pp. 1-13.
3. 한국에너지기술연구원, "국내풍력발전 현황", [http://kredc.kier.re.kr/kier/02\\_energyInfo/Wind\\_countryin.aspx](http://kredc.kier.re.kr/kier/02_energyInfo/Wind_countryin.aspx).
4. G. S. Park, K. G. Ryu, and H. G. Kim, "Wake Losses and Repositioning of Wind turbines at Wind Farm", *J. Korean Solar Energy. Society*, Vol. 35, No. 3, 2015, pp. 17-25.
5. S. H. Lee, H. G. Jeong, and S. D. Kwon, "Effects of Turbulence Intensities on Wake Models of Horizontal Wind Turbine", *J. Compt. Struct. Eng. Inst. Korea*, Vol. 27, No. 4, 2014, pp. 273-279.
6. S. H. Park, K. H. Kim, K.S. Lee, Y. S. Park, H. S. Oh, H. K. Shin, and K. Y. Hong, "Arrangement Design and Performance Evaluation for Multiple Wind Turbines of 10MW Class Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation Systems", *J. Korean Society. Maritime Environment. Energy*, Vol. 18, No. 2, 2015, pp. 123-132.
7. C. M. Jang, S. M. Lee, W. H. Jeon, and T. G. Lim, "Evaluation of Energy Production for a Small Wind Turbine by Considering the Geometric Shape of the Deokjeok-Do Island", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 6, 2014, pp. 629-635.
8. J. H. Kim, "Modeling & Operating Algorithm of Islanding Microgrid with Wind Turbine, Deisel Generator and BESS", *J. Korea Acad.-Indus. Cooper. Society*, Vol. 15, No. 9, 2014, pp. 5893-5898.
9. Y. T. Lee, and H. C. Lim, "Numerical Study to Determine Optimal Design of 500W Darrieus-type Vertical Axis Wind Turbine", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 8, 2015, pp. 693-702.
10. S. H. Kim and C. U. Cheong, "Numerical Investigation on the Flow Noise Characteristics of the Hybrid Vertical-axis Wind Turbine", *J. Acos. Soc. Korea*, Vol. 33, No. 6, 2014, pp. 693-702.
11. S. M. Lee and C. M. Jang, "Analysis of Annual Energy Production of Vertical Axis Wind Turbine using Experimental and Numerical Simulation", *ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference*, 2015, pp. 1940-1941.
12. SC/Tetra 9.0, User Guide, Software Cradle Co. Ltd. (2010).