

풍력발전단지의 후류 효과 분석 및 배열 최적화에 관한 연구

김규원, 김나현, 최재훈, 김건우, 안성환

경산과학고등학교

Supporting Information Placeholder (Highly Recommended)

ABSTRACT: 풍력발전은 대표적인 재생에너지로서, 대규모 발전단지 조성을 통해 전력 생산의 효율을 높일 수 있다. 그러나 다수의 풍력발전기를 일정 간격으로 배치할 경우, 앞쪽 터빈이 생성하는 후류(wake)로 인해 후방 터빈의 입사풍 속도가 감소하고 난류가 형성되어 발전 효율이 저하되는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 풍력발전기의 배열 최적화를 위해 개수와 배열 간격, 그리고 배치 각도에 따른 후류 효과를 정량적으로 분석하였다. 총 3 기의 풍력발전기 모형을 제작하여, 발전기 간 거리를 15cm, 30cm, 45cm, 60cm 로 달리하고, 각도를 15°, 30°, 45°로 조정된 조건에서 실험을 수행하였다. MBL 에너지 센서를 이용해 전력 및 에너지 생산량을 측정하였으며, 풍동 실험과 시뮬레이션을 병행하여 발전기 간 간섭 현상을 시각적으로 확인하였다.

핵심어: 풍력 발전, 후류 효과, 배열 최적화, CFD

1. 연구 동기 및 목적

가. 연구의 필요성 및 동기

풍력발전은 대표적인 재생에너지로, 대규모 단지 조성을 통해 높은 발전 효율을 얻을 수 있다. 그러나 여러 풍력발전기를 일정 간격으로 배치할 경우, 앞쪽 터빈이 만든 후류(wake effect)로 인해 뒤쪽 터빈의 입사풍 속도가 감소하고 난류가 발생하여 효율이 저하되는 문제가 생긴다. 이러한 후류의 영향은 발전기 간 거리와 배열 각도에 따라 달라지므로, 효율적인 단지 설계를 위해 이를 정량적으로

분석할 필요가 있다. 본 연구는 발전기의 간격과 배열 형태가 전력 생산 효율에 미치는 영향을 실험과 시뮬레이션을 통해 규명하고, 후류 손실을 최소화할 수 있는 배열 조건을 도출하고자 한다.

나. 연구 목적

본 연구의 목적은 다음과 같다.

첫째, 여러 개의 풍력발전기가 인접해 설치될 경우 발생하는 후류 효과가 각 풍력발전기 간에 어떠한 영향을 미치는지를 분석한다.

풍력발전기 모형을 총 3 기 제작한 뒤, 발전기 수에 따라 1 기, 2 기, 3 기로 나누어 각 경우에 대해 실험과 시뮬레이션을 병행하여 진행하였다. 실험에서는 발전기 간 간격을 각각 15cm, 30cm, 45cm, 60cm 로 설정하여 총 4 가지 조건을 구성하였으며 발전기의 각도를 15, 30, 45 도 3 가지 조건을 구성하여 실험하였다. MBL 에너지 센서를 활용하여 각 풍력발전기의 전력 및 에너지 생산량을 측정하였다. 또한 풍동 실험과 시뮬레이션 기법을 활용하여, 발전기 수와 배열 방식에 따라 발생하는 후류(wake) 효과가 풍력발전기의 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 시각적으로 분석하였다.

둘째, 여러 가지 풍력발전기 배치 방식 중에서 발전 효율이 가장 높은 최적의 배열 형태를 도출한다.

실험을 통해 얻은 전력 및 에너지 데이터의 평균값을 도출한 뒤, 이를 풍력발전기 개수에 따른 후류 효과와 연계하여 비교 분석하였다. 이를 통해 발전기 수와 배열 방식에 따라 전력량과 에너지 생산량이 어떻게 변화하는지를

파악하고, 어떤 배열과 조건에서 발전 효율이 가장 높은지 확인하였다.

2. 선행 연구 조사 및 이론적 배경

가. 선행 연구 조사

관련 논문 목록

제목	저자/출원인	학회명/출원번호
해상풍력발전단지의 배치에 따른 연간 에너지생산량 추정	이상언	대한토목학회
후류가 하류 풍력발전기의 발전량에 미치는 영향	홍영진, 유호선	플랜트 저널
다수 풍력터빈의 후류영향 최소화 및 연간발전량 극대화를 위한 부유식 파력-해상풍력 플랫폼 최적배치	김중화	한국에너지학회

3. 연구 과정

가. 풍력발전기 제작



그림 1. 사용한 풍력 발전 키트



그림 2. 풍력 발전 키트 조립

본 탐구에서는 풍력 발전기의 배치에 따라 달라지는 전류 값을 실험적으로 수집하기 위해 풍력 발전기 키트를 활용하였다. 이 키트는 본체 내부에 소형 모터가 탑재되어 있어, 블레이드를 회전시킴으로써 전류를 생성하는 구조로 되어 있다. 생성된 전류는 내부 전선을 통해 센서로 전달되며, 실험에서는 전류 뿐만 아니라 전압과 에너지 등 다양한 데이터를 수집하기 위해 기존의 전류 MBL 센서 대신 에너지 MBL 센서를 사용하였다.

나. 풍력발전기 거리별 실험

본 실험은 풍력발전기의 위치에 따른 발전 효율 변화를 분석하기 위해 수행되었다. 이를 위해 제주도의 평균 풍속을 기준으로 설정한 풍속을 선풍기를 이용해 재현하고, 축소 모형 풍력발전기에 바람을 인가하여 발전량을 측정하였다. 먼저, 단일 풍력발전기 모델 실험에서는 선풍기로부터의 거리를 각각 30cm, 45cm, 60cm 로 설정하여 발전량을 측정하였다. 이후, 두 대의 풍력발전기를 직렬로 배치한 실험에서는 첫 번째 발전기(전방)를 선풍기로부터 15cm 위치에 고정하고, 두 번째 발전기(후방)를 단일 실험과 동일하게 30cm, 45cm, 60cm 위치에 배치하여 실험을 반복하였다. 또한 각 실험에서 바람의 방향과 선풍기가

이루는 각도를 0 도, 30 도, 45 도로 나누어 진행하였다. 이는 후방에 위치한 풍력발전기에 영향을 줄 수 있는 후류 효과를



고려하여, 동일한 조건에서 위치 변화가 발전 효율에 미치는 영향을 비교하기 위함이다.



그림 3. 기본 실험 장면

풍력발전기를 이용하여 전류의 RMS 값, 전압의 RMS 값, 에너지의 평균값의 세 가지 지표를 측정하였다. 측정 시간은 선풍기를 작동시킨 시점으로부터 5 초에서 13 초 구간으로 설정하였으며, 해당 구간 동안의 데이터를 기반으로 각 실험 조건에 따른 발전 효율을 비교·분석하였다.



그림 4. 에너지 MBL 센서

1) 풍력발전기 1 개

<표 1> 풍력발전기 1 개일때 풍력발전기 각도가 0 도일때 거리에 따른 파라미터

	30cm	45cm	60cm
Current rms	7.321	8.142	7.9083
Voltage rms	0.264	0.261	0.312
energy average	0.013	0.013	0.006

<표 2> 풍력발전기 1 개일 때 풍력발전기 각도가 30 도일 때 거리에 따른 파라미터

	30cm	45cm	60cm
Current rms	8.9529	11.878	9.1999
Voltage rms	0.3573	0.3936	0.3421
energy average	0.015	0.0168	0.011

<표 3> 풍력발전기 1 개일 때 풍력발전기 각도가 45 도일 때 거리에 따른 파라미터

	30cm	45cm	60cm
Current rms	8.5624	10.0899	4.5067

Voltage rms	0.3103	0.3241	0.2247
energy average	0.008	0.0103	0.003



Voltage rms	0.1787	0.1610	0.1551
energy average	0.0020	0.0013	0.0016

<표 6> 풍력발전기 2 개일 때 풍력발전기 각도가 45 도일 때 거리에 따른 파라미터

2) 풍력발전기 2 개

<표 4> 풍력발전기 2 개일 때 풍력발전기 각도가 0 도일 때 거리에 따른 파라미터

	30cm	45cm	60cm
Current rms	3.0544	3.5526	1.5864
Voltage rms	0.2022	0.1497	0.0878
energy average	0.0018	0.0014	0.0003

<표 5> 풍력발전기 2 개일 때 풍력발전기 각도가 30 도일 때 거리에 따른 파라미터

	30cm	45cm	60cm
Current rms	2.3644	1.4877	3.5949

	30cm	45cm	60cm
Current rms	3.5656	4.2388	3.6009
Voltage rms	0.1661	0.1499	0.1297
energy average	0.0018	0.0034	0.0013

3) 풍력발전기 3 개

<표 7> 풍력발전기 3 개일 때 풍력발전기 각도가 0 도일 때 거리에 따른 파라미터

	45cm	60cm
Current rms	4.305	2.298
Voltage rms	0.164	0.108

energy average	0.003	0.001
----------------	-------	-------

energy average	0.0003	0.0003
----------------	--------	--------

<표 8> 풍력발전기 3 개일 때 풍력발전기 각도가 30 도일 때 거리에 따른 파라미터

	45cm	60cm
Current rms	0	0
Voltage rms	0.065	0.068
energy average	0.0002	0.0002

<표 9> 풍력발전기 3 개일 때 풍력발전기 각도가 45 도일 때 거리에 따른 파라미터

	45cm	60cm
Current rms	0	0.139
Voltage rms	0.156	1.148

4) 풍력발전기 1 개 실험 분석

◆ 각도 0°

전류는 45cm 거리에서 8.142A 로 가장 크다.

전압은 60cm 거리에서 0.312V 로 가장 크다.

에너지는 30cm, 45cm 거리모두 0.013J 로 가장 크다.

◆ 각도 30°

전류는 45cm 거리에서 11.878A 로 가장 크다.

전압은 45cm 거리에서 0.3936V 로 가장 크다.

에너지는 45cm 거리에서 0.0168J 로 가장 크다.

◆ 각도 45°

전류는 45cm 거리에서 10.0899A 로 가장 크다.

전압은 45cm 거리에서 0.3241V 로 가장 크다.

에너지는 45cm 거리에서 0.0103J 로 가장 크다.

5) 풍력발전기 2 개 실험 분석

◆ 각도 0°

전류는 45cm 거리에서 11.878A 로 가장 크다.

전압은 45cm 거리에서 0.3936V 로 가장 크다.

에너지는 45cm 거리에서 0.0168J 로 가장 크다.

◆ 각도 30°

전류는 45cm 거리에서 11.878A 로 가장 크다.

전압은 45cm 거리에서 0.3936V 로 가장 크다.

에너지는 45cm 거리에서 0.0168J 로 가장 크다.

◆ 각도 45°

전류는 45cm 거리에서 3.5526A 로 가장 크다.

전압은 30cm 거리에서 0.2022V 로 가장 크다.

에너지는 30cm 거리에서 0.0018J 로 가장 크다.

6) 풍력발전기 3 개 실험 분석

◆ 각도 0°

전류는 60cm 거리에서 3.5949A 로 가장 크다.

전압은 30cm 거리에서 0.1787V 로 가장 크다.

에너지는 30cm 거리에서 0.0020J 로 가장 크다.

◆ 각도 30°

전류는 45cm 거리에서 4.2388A 로 가장 크다.

전압은 30cm 거리에서 0.1661V 로 가장 크다.

에너지는 45cm 거리에서 0.0034J 로 가장 크다.

◆ 각도 45°

전류는 45cm 거리에서 4.305A 로 가장 크다.

전압은 45cm 거리에서 0.164V 로 가장 크다.

에너지는 45cm 거리에서 0.003J 로 가장 크다.

다. 전산유체역학 시뮬레이션

1) 풍력발전기 모델링

선행 탐구에서 사용한 풍력발전기 크기를 기반으로, <Autodesk Fusion>을 활용하여 풍력발전기를 모델링하였다. 모델링한 풍력발전기는 블레이드 길이 18cm, 블레이드 폭 2.5~3.5(실제 블레이드와 같이 중심으로 갈수록 증가하는 형태), 블레이드 중심까지의 높이 27cm 의 크기가 반영되었다.

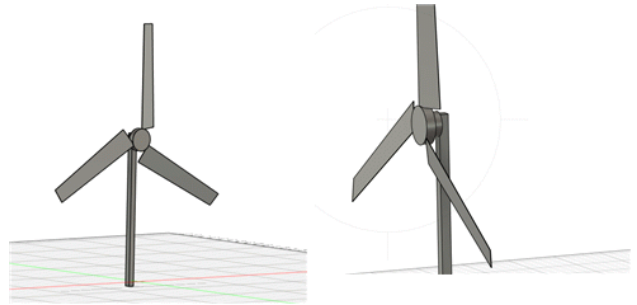
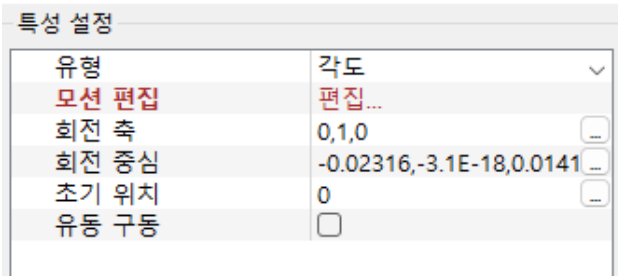


그림 5. CAD 디자인

2) CFD 설정

본 시뮬레이션은 제주도의 평균 풍속을 반영하여 단일 풍력터빈의 후류 현상을 분석하고자 하였다. 사용한 전산유체역학 프로그램은 <Autodesk CFD 2026>이다. 블레이드 후류를 파악할 수 있을 크기로 외부 체적을 설정하고, 외부체적의 재료를 공기로 설정하였다. 아래 사진에서 CFDCreatedVolume 은 외부 체적을, Part1.Body1 는 풍력발전기의 블레이드를, Part2.Body5 는 풍력발전기의 기동을 의미한다.

모션



해석

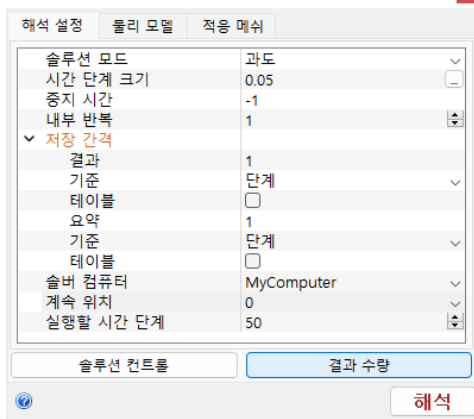


그림 6. CFD 메뉴

풍력 발전기가 주로 설치되는 고산 지역의 풍속과 비슷한 조건을 형성하기 위하여 블레이드와 마주보는 외부체적의 두 면을 각각 101320, 101280 Pa 로 설정하였다. 이외의 면은

공기의 형성에는 영향을 미치지 않되, 공기가 벽면을 따라 흘러갈 수 있도록 미끄럼/대칭으로 경계 조건을 작성하였다.

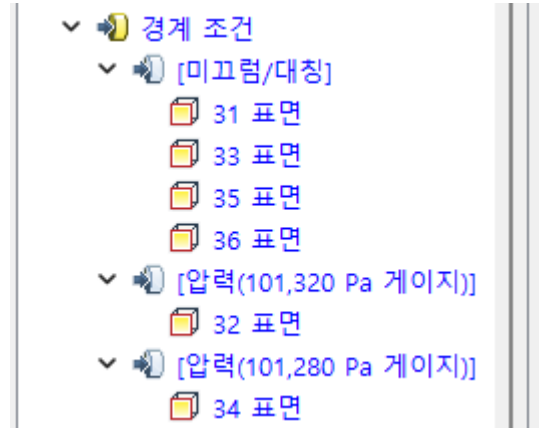


그림 7. 경계조건 설정

풍력발전기의 기동인 Part1.Body1 은 바람에 의해 이동하지 않도록 메쉬 조건에서 억제하였고, 풍력발전기의 블레이드인 Part2.Body5 를 Y 축을 기준으로 회전하도록 모션에서 설정하였다.

해석은 다음과 같이 0.05 초 간격으로 50 초 간 진행하였다.

3) 시뮬레이션 결과

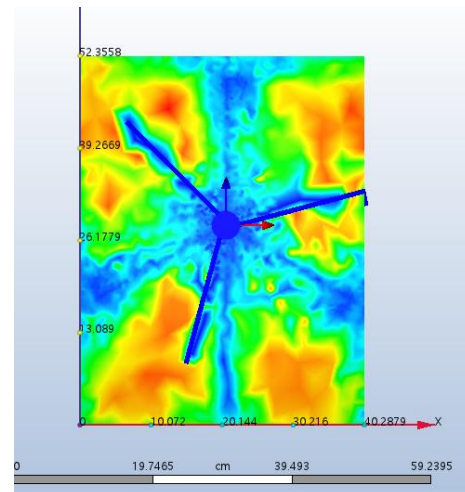


그림 8. CFD 결과

위 사진은 단일 풍력발전기에 대한 시뮬레이션 실행 장면이다. 본 시뮬레이션은 앞선 과정에서 서술한 것과 같이 동일한 조건에서 수행되었으며, 후류의 공간적 분포를 보다 명확히 파악하기 위하여 정면(X-Y 평면)과 측면(X-Z 평면) 두 가지 관점에서 결과를 분석하고자 한다.

정면에서 관찰했을 때, 풍력발전기 블레이드의 회전에 따라 중심축을 기준으로 속도가 저하된 영역이 명확히 나타났으며, 이는 블레이드가 바람의 운동 에너지를 추출함에 따라 형성되는 전형적인 후류 구조이다.

측면 관점에서는 이러한 유속 저하 현상이 특히 풍력발전기 기동 높이를 중심으로 후방으로 길게 이어졌으며, 시간이 경과함에 따라 후류의 영역이 점점 확산되었다. 시뮬레이션이 진행된 지 약 50 초가 지난 시점에서는 외부체적으로 설정한 영역 전체에 걸쳐 유속이 저하된 모습이 나타나, 후류의 영향 범위가 넓다는 것을 시각적으로 확인할 수 있었다.

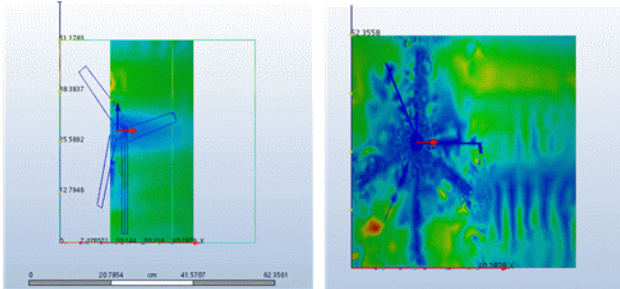


그림 9. CFD 측면 분석

4. 연구 결과

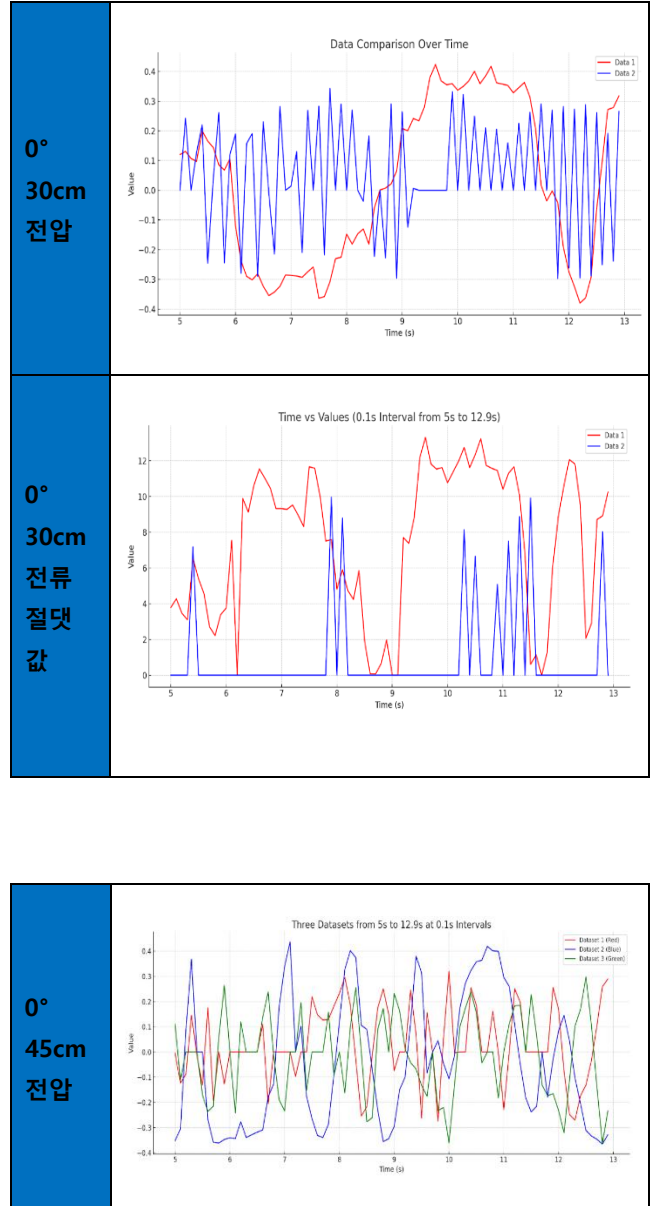
본 실험 결과, 풍력발전기 2 개 및 3 개 실험에서 후방 부근에 위치한 풍력발전기 블레이드의 회전 속도가 눈에 띄게 감소하는 것을 확인하였다. 각도 측면에서는 45 도 배열의 블레이드가 다른 블레이드 배열보다 현저히 속도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

다음은 각도 및 거리에 따른 전압과 전류 그래프를 나타낸 것이다.

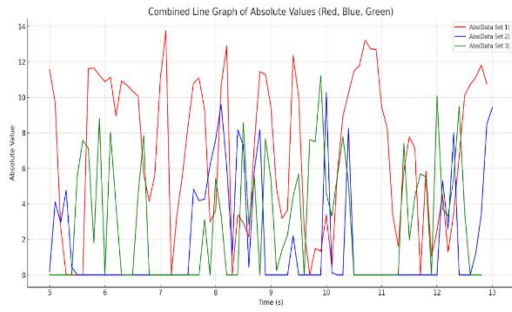
빨간색: 1 개일 때 전류/전압 측정값

파란색: 2 개일 때 전류/전압 측정값

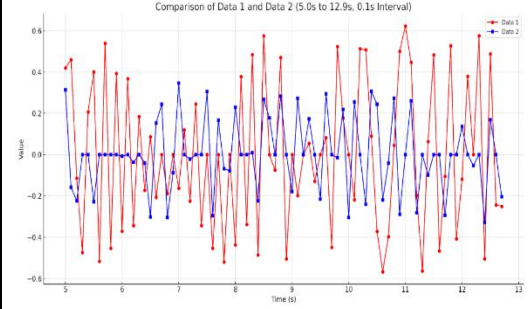
초록색: 3 개일 때 전류/전압 측정값



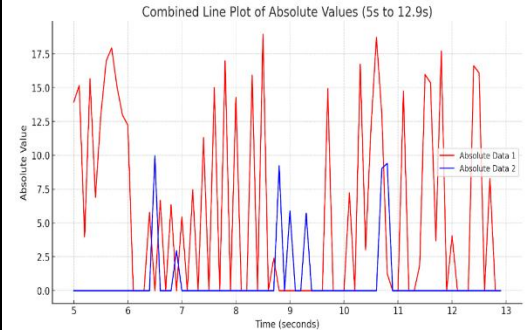
0°
45cm
전류
절댓값



30°
30cm
전압



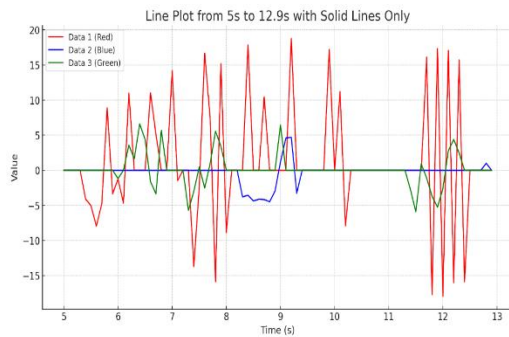
30°
30cm
전압
절댓값



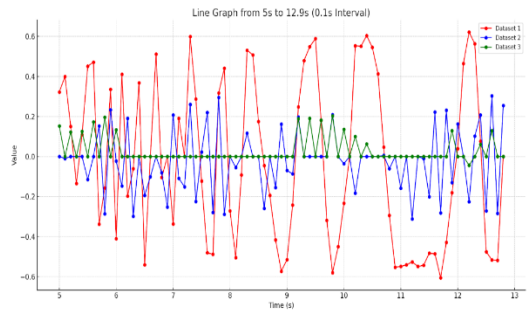
0°
60cm
전압



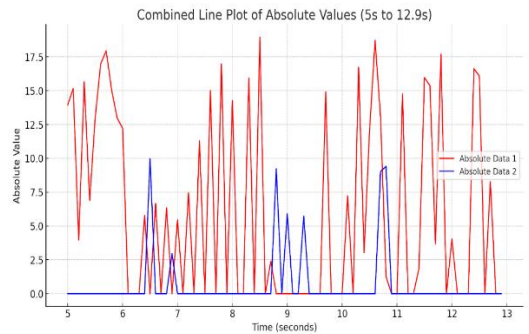
0°
60cm
전류
절댓값



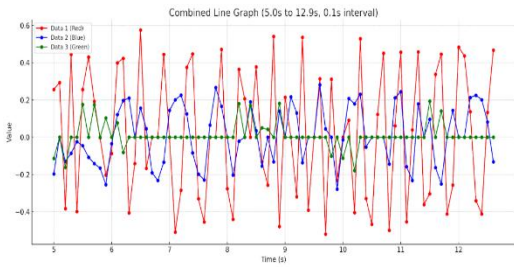
30°
45cm
전압



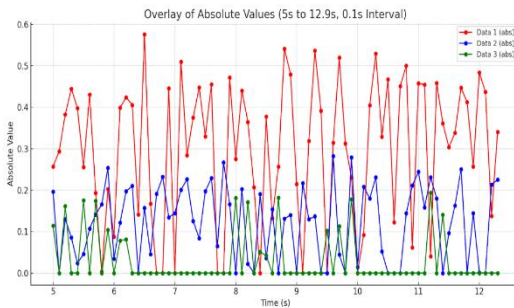
30°
45cm
전압
절댓값



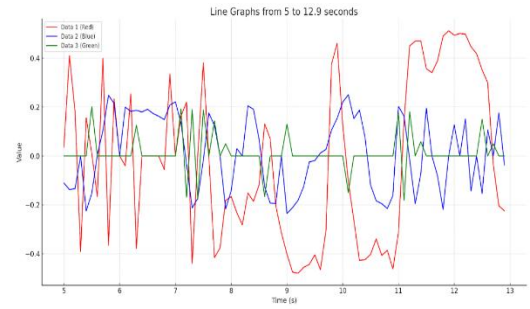
30°
60cm
전압



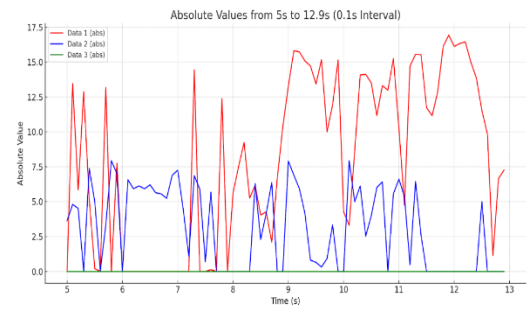
30°
60cm
전압
절댓값



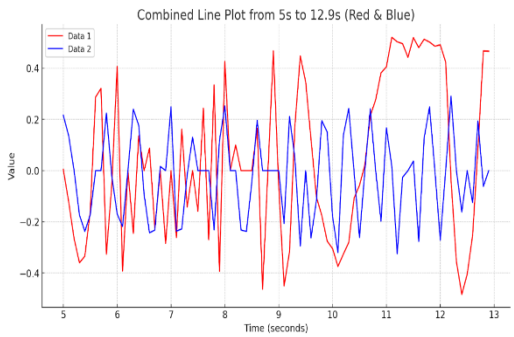
45°
45cm
전압



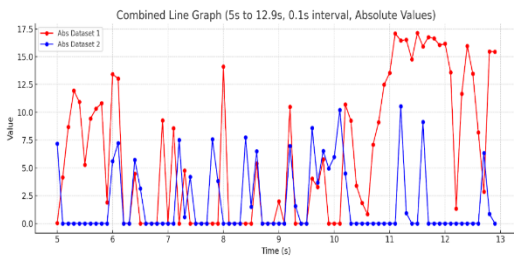
45°
45cm
전류
절댓값



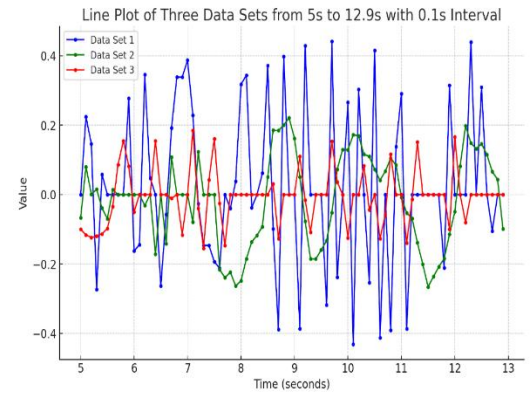
45°
30cm
전압

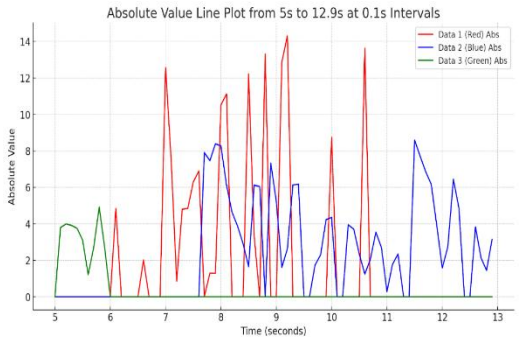


45°
30cm
전류
절댓값



45°
60cm
전압





5. 연구 결론 및 제언

가. 연구 결론

본 연구는 풍력발전기의 배열에 따른 후류 효과(wake effect)가 전력 생산 효율에 미치는 영향을 실험과 전산유체역학(CFD) 시뮬레이션을 통해 정량적으로 분석하였다. 실험에서는 발전기 수, 간격, 각도를 조절하여 다양한 조건을 비교하였으며, 그 결과 발전기 간 거리는 약 45cm 일 때 가장 높은 효율을 나타냈다. 특히 2 대 배열의 경우, 45cm 간격의 0 도 직렬 배열에서 전류 11.878A, 전압 0.3936V, 에너지 0.0168J 로 모든 조건 중 최고의 성능을 기록하였다. 반면, 발전기 수가 3 대 이상으로 늘어날 경우, 직렬 배열보다 30 도 정도의 분산 배열이 후류 누적을 줄여 상대적으로 높은 효율을 보였다. 이는 발전기 간 간격뿐만 아니라 배열 각도의 조절이 효율 향상에 핵심적임을 시사한다.

또한 CFD 시뮬레이션을 통해 단일 터빈의 후류 현상을 시각적으로 분석한 결과, 풍력발전기 후방에서 바람의 속도가 감소하고 난류 강도가 증가하는 전형적인 후류 구조가 확인되었으며, 이는 실험 결과와 일치하였다. 이를 통해 동일한 바람 방향 기준의 직렬 배치는 후방 터빈의 효율 저하를 유발한다는 점을 정성·정량적으로 검증할 수 있었다.

결론적으로, 발전기 간 거리는 45cm 가 가장 안정적인 효율을 보였으며, 배열 각도는 발전기 수에 따라 달리 설정하는 것이 중요하다. 본 연구는 배열 최적화를 통해 후류 영향을 최소화하고 전체 발전 효율을 향상시킬 수 있음을 실험과 시뮬레이션을 통해 입증하였으며, 이는 향후

제주도와 같이 기상 및 지형 조건이 복잡한 지역에서 풍력발전단지를 설계할 때 실질적인 기준과 전략을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

나. 제언

본 연구는 풍력발전기 간 배열에 따른 후류 효과를 실험 및 시뮬레이션을 통해 정량적으로 분석하였으며, 발전기 간 최적 간격과 배열 각도에 따라 발전 효율이 유의미하게 달라짐을 확인하였다. 특히 45cm 간격에서의 배열이 가장 높은 효율을 보였다는 결과는 실제 풍력발전단지 설계 시 중요한 기초자료가 될 수 있다. 그러나 본 연구는 축소 모델 실험과 단일 터빈 중심의 CFD 시뮬레이션에 국한되어 있어, 실제 대규모 단지에서 발생할 수 있는 복합적인 후류 누적 현상이나 주변 지형, 풍향 변화 등의 요소를 충분히 반영하지 못했다는 한계가 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 보다 현실적인 조건을 반영한 발전 방향이 필요하다. 첫째, 복수의 풍력발전기를 포함한 시뮬레이션을 통해 배열 간 상호작용과 후류의 누적 효과를 보다 정밀하게 분석할 것이다. 둘째, 우리나라는 계절에 따라 바람의 방향과 세기가 급변하는 특성을 가지므로, 다양한 바람 조건을 설정한 실험을 통해 배열의 안정성과 유효성을 종합적으로 평가할 것이다.

REFERENCES

- [1] 이상언, 박진호, 정용태, & 이경훈. (2012). 해상풍력발전단지의 배치에 따른 연간 에너지생산량추정. 2012 대한토목학회 정기학술대회 논문집.
- [2] 김영중. (2013). 이격거리에 따른 해상풍력 발전단지 최적설계에 대한 연구. 목포대학교 대학원,
- [3] 홍영진, & 유호선. (2016). 후류가 하류 풍력발전기의 발전량에 미치는 영향. 플랜트 저널, 12(3), 32–38.
- [4] 배윤혁, & 김무현. (2015). 부유식 다수 풍력 발전기에 작용하는 비대칭 공력 하중의 영향. 한국해양공학회지, 29(3), 255–262.
- [5] 김중화, 정지현, & 김범석. (2017). 다수 풍력터빈의 후류영향 최소화 및 연간발전량 극대화를 위한 부유식 파력-

해상풍력 플랫폼 최적배치. 한국해양공학회지, 41(3), 209–215.