

Wing Fence와 Relative Curvature를 적용한 사이클로디얼 프로펠러의 성능 검증

본 연구에서는 Cycloidal Propeller의 효율 개선을 위해 Wing Fence 구조와 Virtual Camber 효과를 고려한 날개 형상을 적용하는 방안을 모색하였다. Cycloidal Propeller는 회전축이 유체의 이동 방향에 수직인 유체 추진 장치로, 항공 및 수상 차량의 추진, 상승, 조종에 사용된다. 그러나 기존의 Cycloidal Propeller는 상대 곡률에 의해 전력 손실이 발생하는 문제가 있었다. 이에 본 연구에서는 공력학적 장치인 Wing Fence의 원리를 도입하여 안정성 및 추력을 향상시키고, Relative Curvature 형상을 최적화하여 전력 손실을 줄이는 방안을 제시하였다. Computational Fluid Mechanics를 이용한 실험 결과, 새로운 구조와 형상이 적용된 Cycloidal Propeller는 기존 대비 효율 개선을 보였으며, 이는 향후 항공 및 수상 차량의 추진 시스템에 대한 새로운 접근 방법을 제공할 것으로 기대된다.

1. 서론 (Abstract)

Cycloidal Propeller는 유체 추진 장치로, 항공 및 수상 차량의 추진, 상승, 조종에 중요한 역할을 수행한다. 본 연구에서는 Wing Fence와 Relative Curvature라는 두 가지 아이디어를 Cycloidal Propeller에 접목한다. Wing Fence는 주로 Swept-wing 항공기에 장착되며, 날개면상에서 공기의 방향을 제어하여 날개의 안정적 추력 향상에 도움을 준다. 반면, Relative Curvature는 축 상에서 회전하는 날개에 대한 상대 곡률을 계산하는 기법이다. 두 개념을 Cycloidal Propeller에 적용하여 성능을 개선하고자 한다.

본 연구에서는 Cycloidal propeller의 성능 개선과 관련하여 다음 세 가설을 세우고, 이를 증명하기 위한 시뮬레이션과 실험을 진행하였다.

가설 1. Cycloidal propeller의 회전 반경과 같은 곡률 반지름의 날개를 이용하면 Drag를 감소시켜 효율을 높일 수 있다.

가설 2. Cycloidal propeller의 회전 반경과 같은 곡률 반지름의 날개를 이용하면 추력을 증가시킬 수 있다.

가설 3. Cycloidal propeller의 날개에 Wing Fence 구조를 설치하면 추력 개선 효과가 있다.

2. 본문

1. 가설에 대한 정성적인 근거

P. G. Migliore의 ‘Flow Curvature Effects on Darrieus Turbine Blade Aerodynamics’ [2]에 따르면, Darrieus turbine blade의 공기역학적 특성에는 유체 흐름의 곡률이 중요한 영향을 끼친다. Darrieus turbine은 Cyclorotor와 유사하게 날개를 축 주위로 회전시키는 풍력발전기이다. 이때 각 날개는 곡선 운동을 하게 되는데, 이 때문에 실제보다 캠버(camber)가 큰 (익형의 휘어진 정도가 큰) 효과가 발생하고, 이를 virtual camber effect라 한다. 해당 논문에서는 이를 conformal mapping technique를 이용하여 표현한다.

또한 virtual camber effect에 의해 받음각(Angle of Attack, AoA)이 증가하는 효과도 있다.

가설 1) Cycloidal propeller의 회전 반경과 같은 곡률 반지름의 날개를 이용할 경우, Relative Curvature에 의해 angle of attack이 0인 상황과 대응되어 drag force가 최소일 것이다.

가설 2) 날개 자체가 휘어져 있으면 virtual camber effect 외에도 날개에 camber가 있는 효과가 있어 날개가 cycloidal propeller의 위, 아래쪽에 있을 때 받는 양력이 더 클 것이다.

가설 3) Swept-wing 항공기에 설치되는 wing fence와 마찬가지로, cycloidal propeller의 날개에 wing fence 유사 구조물을 설치하면 Wing Span 방향으로의 유체 흐름을 제어하여 양력이 커질 것이다.

2. CFD를 이용한 가설 검증.

2.1 CFD를 이용한 가설 1 검증

Cycloidal propeller의 날개 구조에 따라 pitch angle이 0일 때 작용하는 drag force를 비교하기 위해 Autodesk CFD를 이용한 시뮬레이션을 진행했다. 실제 실험 조건과 같이 지름 500mm인 영역의 중심을 기준으로 반지름 70mm인 원형 레도를 따라 StraightFlap 또는 RoundFlap을 700 RPM으로 회전시켰다. 유체는 Air, 날개는 ABS(molded)로 설정했다.

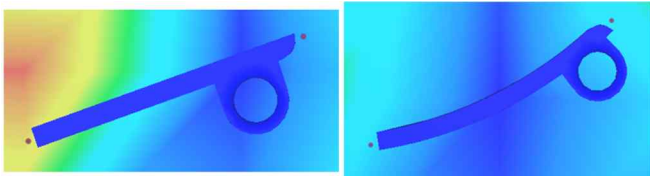
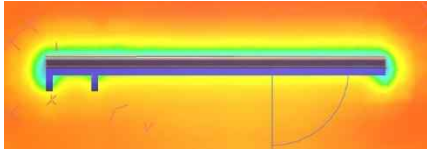


그림 1 : A. StraightFlap 앞뒤 압력 측정점 / B. RoundFlap 앞뒤 압력 측정점

2.2 CFD를 이용한 가설 3 검증

Cycloidal propeller의 날개에 부착된 wing fence 구조의 효과를 이론적으로 확인해보기 위해 Autodesk CFD를 이용한 시뮬레이션을 진행했다. 10m/s의 rectilinear한

공기 흐름 속에서 StraightFlap과 StraightWF Flap을 각각 pitch angle이 0도, 15도인 경우에 대해 50 step 이후의 결과를 측정했다. 시뮬레이션 영역은 날개를 중심에 둔 300mm*200mm*500mm 크기의 직육면체이다. 유체는 Air, 날개는 ABS(molded)로 설정했다.



3. 실험을 이용한 검증

3.1 실험 설계

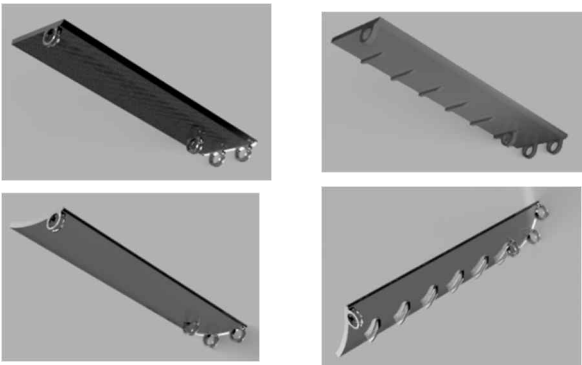
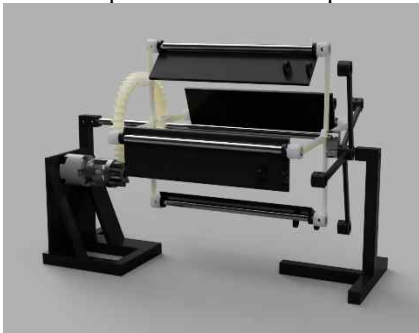


그림 2 : A : StraightFlap. B : StraightWF Flap. C : RoundFlap. D : RoundWF Flap



3.2 실험 구성

전류 등 측정장치를 연결하여 모터에 공급되고 있는 에너지를 측정할 수 있게 세팅했다. RoundFlap, StraightFlap, StraightWF Flap, RoundWFFlap에 대해 각각 8번씩 실험하며 측정 순간의 시간에 따른 에너지 전달률(출력)[W]과 양력[g]을 측정했다.



4. 결론

가설 1. Cycloidal propeller의 회전 반경과 같은 곡률 반지름의 날개를 이용하면 drag를 감소시켜 효율을 높일 수 있다.

RoundFlap을 이용한 날개의 경우, StraightFlap을 적용한 날개에 비해서 15.77% 성능 증가가 있었다. 이는 앞서 제시한 유선형 저항 감소의 원인으로 파악된다.

가설 2. Cycloidal propeller의 회전 반경과 같은 곡률 반지름의 날개를 이용하면 추력을 증가시킬 수 있다.

RoundFlap을 이용한 날개의 경우, StraightFlap을 적용한 날개에 비해서 15.77% 성능 증가가 있었으며, 이는 앞서 제시한 AoA의 증가로 인한 것으로 예상된다.

가설 3. Cycloidal propeller의 날개에 wing fence 구조를 설치하면 추력 개선 효과가 있다.

Wing fence 구조가 있을 때와 없을 때 날개에 작용하는 양력, drag force, 날개 표면에서 날개와 나란한 방향으로 흐르는 속력 분포를 시뮬레이션으로 분석한 결과, wing fence 구조가 있을 때 날개와 나란한 방향의 속력 성분의 분포가 0에 더 가까우며 밀집되어 있고, 양력 또한 증가함을 확인했다. 즉 가설 3은 참이다. 시뮬레이션뿐만 아니라 실험적으로도 검증되었다. StraightFlap에 비하여 StraightFlapWF 사용 시 54.55%의 성능 증가가 있었다.

위에서 언급된 성능은, 모터에 공급되는 W로 발생하는 추력을 나눈 것을 성능효율 지표로 사용하였다.

3. 참고문헌

- [1] "NACA Airfoil." Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil.
- [2] P. G. Migliore, W. P. Wolfe and J. B. Fanucci, Flow Curvature Effects on Darrieus Turbine Blade Aerodynamics
- [3] Hiromichi Akimoto, Yutaka Hara, Takafumi Kawamura, Takuju Nakamura and Yeon-Seung Lee, A conformal mapping technique to correlate the rotating flow around a wing section of vertical axis wind turbine and an equivalent linear flow around a static wing