

Original Article

다리우스 터빈 성능에 대한 가변 형상 블레이드의 영향 연구

고진환^{1,†} · 파타르 에벤네저 시토러스² · 김지훈³

¹제주대학교 기계공학전공 조교수

²한국해양과학기술원 연안개발센터 연구원

³한국해양과학기술원 수중건설로봇사업단 선임연구원

Effect of Variable Shape Blade on the Performance of Darrius Turbine

Jin Hwan Ko^{1,†}, Patar Ebenezer Sitorus², and Jihoon Kim³

¹Assistant Professor, Major of Mechanical Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

²Researcher, Coastal Development Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

³Senior Researcher, Underwater Construction Robotics R&D Center, Korea, Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

요 약

다리우스 터빈은 수직축 방식으로 대표적 유동 터빈 중 하나이나 낮은 효율, 흔들림 등 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 가변 형상 블레이드를 구현하고 이를 통한 성능 향상 여부를 개수로 실험을 통해 알아보려고 하였다. 가변 형상의 경우 가변 피치와 가변 피치-캠버가 사용되었고 가변 피치-캠버의 경우는 항공기의 플랩(flap)에 근거한 메커니즘이 고안되었다. 가변 피치와 가변 피치-캠버 두 가지 경우 모두 한계 피치가 10도에서 고정 피치와의 차이점이 두드러졌으며, 효율 증가와 낮은 TSR(tip speed ratio)로의 이동으로 성능이 향상됨을 확인하였다. 또한 가변 피치-캠버의 TSR이 피치와 캠버의 중첩 효과에 기인하여 가변 피치의 TSR보다 더 낮은 값으로 이동하는 것을 확인하였다. 본 실험 연구를 통해 가변 형상 블레이드의 성능 향상 가능성을 볼 수 있었고 향후 이에 대한 실용적인 실험 검증 연구들을 통해 다리우스 터빈의 경쟁력을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – The Darrius turbine is one of the typical vertical axis flow turbines, but it has disadvantages such as low efficiency, shaking etc. In this study, we implemented a variable shape blade and investigated the performance improvement through open water channel experiments. Variable pitch and variable pitch-camber were chosen for the variable shape, and aircraft-flap based mechanism was devised for the variable pitch-camber. Both the variable pitch and the variable pitch-camber showed noticeable difference from the fixed pitch at the limited pitch angle of 10 degrees and the performance was improved by increasing the efficiency and moving to the lower TSR (tip speed ratio). Also, it was indicated that TSRs of the variable pitch-camber shifted to lower values than those of the variable pitch due to the superposition effect of pitch and camber. The experimental results show that the performance of the variable shape blades can be improved and the competitiveness of the Darrius turbine is expected to be improved through practical experimental validation studies.

Keywords: Variable pitch(가변 피치), Variable pitch-camber(가변 피치-캠버), Darrius turbine (다리우스 터빈), Open water channel experiment(개수로 실험)

1. 서 론

다리우스(Darrius) 유동 터빈은 조류에너지 또는 수로의 유동에너지를 추출하는 전형적인 터빈 중 하나로 개발되어 왔다. 이 중 초기

개발된 고정 피치 블레이드 터빈은 강한 흔들림(shaking)이 있으며 시동 토크가 낮고 효율이 낮다는 단점(Kirke and Lazauskas[2011])이 있었다.

이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 가변 피치 블레이드 터빈이 도입되었고 상대적으로 시동 토크가 높고 효율이 높아짐을 확인할 수 있었다(Kirke and Lazauskas[2011]). 피치의 가변성은 강

[†]Corresponding author: jko@jejunu.ac.kr

제될 수도 있고, 한계 각 안에서 자유롭게 주어질 수 있는데 이러한 가변 피치 터빈의 높은 효율은 회전하는 터빈의 방위각(azimuth angle) 대부분 위치에서의 양력(lift force) 증가에 인한 것으로 알려져 있다(Hantoro *et al.*[2011]). 또한, 다른 실험적 및 수치적 연구에서는 블레이드 받음 각(angle of attack)의 최적화와 블레이드와 류(vortex) 간 간섭 감소가 개선의 주요 요인임을 보고 하였다(Zhang *et al.*[2012]). 최근에는 사이클로이드(cycloid) 방식의 강제 피치와 자유 피치 블레이드를 적용한 실험연구 결과도 발표되었다(Jing *et al.*[2014]). 가장 최근 연구에서는 제어 암을 장착한 자유 가변 피치 터빈 프로토타입(0.5 m 직경)이 제작되어 개방 수역에서 시험되었으며 32%의 기계적 동력 효율을 달성하였다(Kirke[2016]). 상기의 실험적 연구들과 더불어 수치적 연구도 활발하게 진행되었으며, 매개변수 수치해석을 통해 고정 피치 블레이드의 단점인 흔들림을 줄이면서 가변 피치의 장점인 높은 시동 토크와 효율을 유지하도록 하는 최적의 피치 매개변수(parameter)를 제시한 대표적인 연구 사례가 있다(Lazauskas and Kirke[2012]). 여기까지 언급된 연구들은 모두 세 개 블레이드의 경우에 한정되어 있으나 수치적인 연구를 통해 네 개 자유 피치 블레이드의 경우, 작은 분당 회전수로 높은 효율을 보임을 보고한 연구도 있다(Sheng *et al.*[2013]). 이론적 방법(analytical method)의 경우, ONERA-EDLIN 모델과 Streamtube 모델을 이용한 해석을 통해 정현 곡선의(sinusoidal) 피치 변화에 따른 효율 향상 결과가 보고되었다 (Paillard *et al.*[2013]). 따라서 가변 피치 터빈의 우수성은 수치적, 실험적 또한 이론적 연구 결과를 통해 확인된 바 있다.

다리우스 터빈의 성능 향상을 위해 가변 피치 외 형상 가변성을 주는 연구로는 가변 캠버가 있다. 가변 캠버의 대표적인 사례는 항공기의 플랩(flap)이 있으며 이는 면적 증가, 양력 증가, 그리고 브레이크 기능으로 사용되고 있다. 이러한 캠버 크기에 따른 영향 연구는 풍력 블레이드에서 활발히 진행되었으나 대부분 CFD를 통한 영향 평가에 한정되어 있다(Beri and Yao[2012], Qamar and Janajreh[2017]). 조류 블레이드의 경우에도 캠버 크기에 따른 영향 연구가 발표(Hyun *et al.*[2012])되기는 하였으나 역시 CFD 연구에 한정되어 있는 상황이다. 최근에는 가동 중 가변 캠버를 갖는 유연 블레이드에 의한 성능 향상을 다룬 CFD 연구도 발표되었다(Drias *et al.*[2018]).

가변 피치 터빈의 경우는 현장 실험이 진행되고 있는 등 실증 단계에 있다고 볼 수 있지만, 가변 캠버 터빈의 경우 CFD 해석을 통한 성능 평가 등에 한정되어 있어 개념 연구 단계에 있다고 볼 수 있다. 그리고 현재 조류 터빈의 상용화는 수평축 터빈을 중심으로 진행되고 있기 때문에 이에 대한 실용적인 대안이 되기 위해서는, 다리우스 터빈의 효율성을 포함한 전반적인 성능이 향상될 필요가 있다. 그런 이유로, 본 연구에서는 가변 피치와 가변 캠버 구현을 위해 슬롯 형태의 구조를 제안하였고 프로토타입을 제작하여 가변 형상 블레이드의 성능 향상 가능성을 개수로(open water channel)에서의 실험적 연구로써 확인해 보고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 가변 형상 터빈 설계와 프로토타입(prototype)

가변 피치 블레이드의 경우는 정지 핀(stopping pin) (Hantoro *et al.*[2011]) 형태와 암 링크 형태(Kirke[2016])가 대표적이며 본 연구에서는 정지 핀과 유사한 개념인 슬롯(slot) 형태를 적용하였다.

Fig. 1은 설계된 형상(CAD)과 제작된 프로토타입을 보여 주며 세부 사양은 Table 1에 기술되어 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 블레이드에 부착된 핀이 움직일 수 있는 슬롯 구조가 구현되고 핀의 부착 위치에 따라 한계 피치각이 0에서 10도까지 2도 간격으로 변할 수 있다. 블레이드와 슬롯 구조는 3차원 프린터로 제작되었고 재질은 PolyCarbonate 이다. 플라스틱 재질이기에, Table 1에 기술된 바와 같이 두께가 있는 단면인 NACA0020을 선택하고 있어, 실험 중 블레이드 자체의 변형량에 의한 효율에 미치는 영향은 무시할 만한 수준으로 예상된다. 블레이드 개수는 전형적인 숫자인 세 개이며 솔리디티(Solidity)는 0.280로, 규모가 작은 실험 시설에서 가변피치와 캠버를 구현하기 위해서 실용적인 블레이드의 솔리디티보다 다소 큰 치수를 사용하게 되었다. 또한 실험 시설의 한계로 인해 직경 300 mm의 모형이 사용되었고 울돌목 실증 실험에서 사용된 용량 500 kW, 직경 3 m 인 수직축 터빈(Han *et al.*[2013])의 1/10 축척(scale)에 해당된다.

가변 피치-캠버 터빈의 구현의 경우 가변 피치 터빈과의 상대 비교를 위해서 직경, 블레이드 수, 스캔길이, 코드길이(c), 단면형상(profile), 피치각 범위, 피치각 분해능(resolution), 그리고 피치 축 위치를 가변 피치 터빈과 같게 하였다. 가변 피치-캠버 메커니즘의

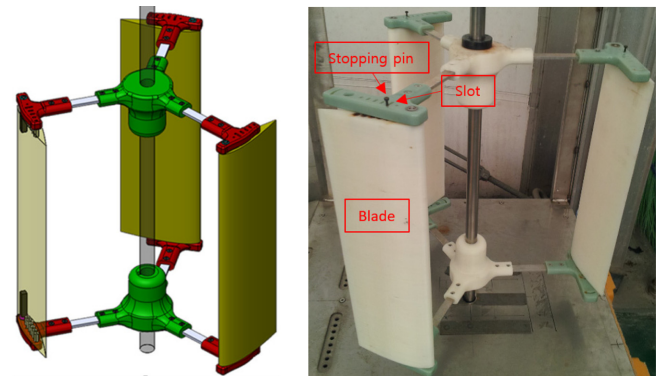


Fig. 1. CAD and prototype of the variable-pitch Darrieus turbine.

Table 1. Specification of the prototype

Diameter	300 mm
Number of blades	3
Blade span length	282 mm
Cord length	87.91 mm
Hydrofoil profile	NACA0020
Pitch angle range	0° ~ ±10°
Pitch angle resolution	2°
Pitch axis	0.1c

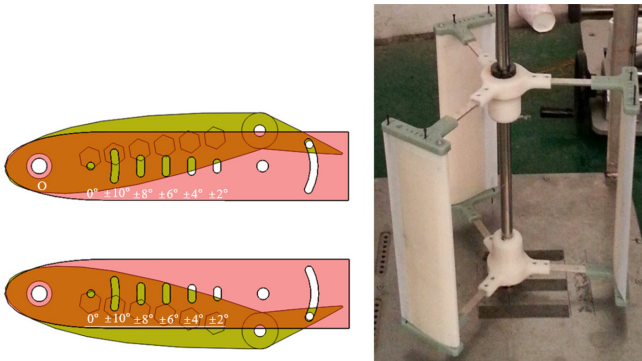


Fig. 2. CAD and prototype of the variable pitch-camber Darrieus turbine.

경우 조류 터빈에 적용된 사례를 찾아보기 어려운 관계로 항공기 날개의 양력 증가에 사용되는 장치인 플랩(flap)에 기반하여 고안되었으며 설계된 형상과 프로토타입은 Fig. 2에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 플랩 구현을 위해 블레이드를 두 개로 분리하고 분리된 구조 간 회전운동만 가능하도록 핀으로 연결하였으며 플랩 길이는 0.25c를 사용하였다. 또한 가변 피치 터빈의 슬롯 구조를 그대로 활용하기 위해서 가변 피치 슬롯들을 이용하여 캠버 크기를 조절할 수 있도록 하였다. 이로 인해 캠버 크기는 물론 코드선(chord line)의 각도가 바뀌는 형태로 구현되었다. 가변 피치 각도(ϕ)에 따라 변화되는 캠버 크기(δ)와 이때 형성되는 코드선의 각도(χ)는 Fig. 3에 나타내었다.

캠버 크기와 코드선 각에 대한 정의는 그림 3(위)와 같으며 피치 각의 증가에 따라 캠버 크기와 코드선 각이 선형적으로 변화하였고, 10도 피치각인 경우 캠버 크기는 0.0875c, 코드선 각은 3.3도 정도로 확인되었다.

2.2 수조, 실험장치와 계측 방법

실험에 사용된 수조는 개수로(open water channel) 형태로서 폭 0.6 m, 길이 25 m를 갖는 한국해양과학기술원의 순환형 장비이며, 개

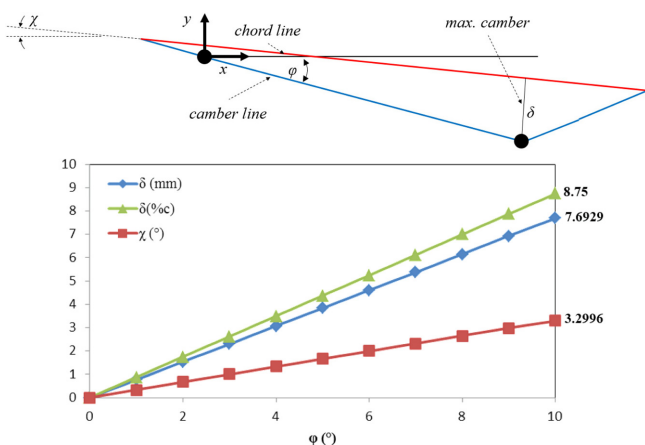


Fig. 3. Definition of maximum camber and angle of chord line (upper); variations of camber and angle of chord line versus pitch angles.

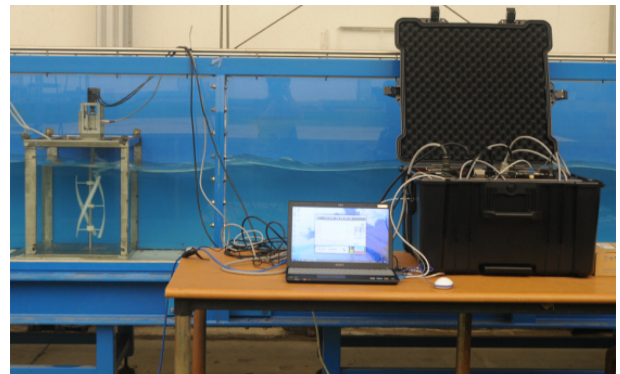


Fig. 4. Open water channel with vertical axis turbine experimental apparatus.

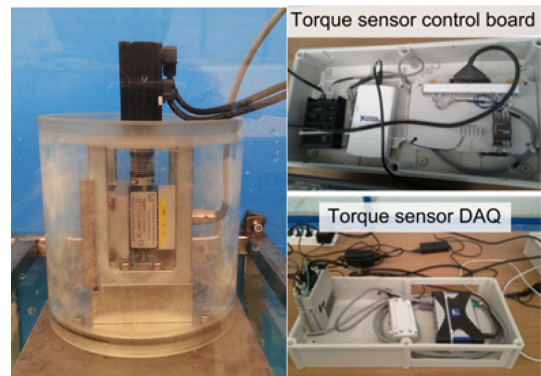


Fig. 5. Measurement and data acquisition system.

수로 수문 개폐 조건에 따라 입사 유속은 최대 1 m/s로 운영이 가능하다.

측정 및 데이터 수집 시스템은 Fig. 5에 나타내었으며 토크 및 RPM(분당 회전 수) 센서는 HBM-T20WN(1N·m, HBM GmbH.)이고 출력 토크를 지속적으로 유지하기 위해서 서보모터(W750, Yaskawa Inc.)를 사용하였다. 해당 서보드라이버(Yaskawa Inc.)를 제어하기 위해 컨트롤 보드(Labview, Texas Instrument Inc.)를 사용하였고, 토크, RPM 및 유속을 통합적으로 기록할 수 있는 데이터 수집 및 기록장치(QuantumX 840A, HBM GmbH.)를 컨트롤 보드와 동기화 하였다. 계측된 모든 데이터는 내부 소프트웨어를 사용하여 ASCII 파일로 저장된다.

내부 소프트웨어의 경우 터빈의 출력 실험을 위해 토크와 RPM을 실시간으로 표시할 수 있으며, 또한 별도로 운영 상태를 모니터링하기 위해 다물리량 측정치 또한 중첩 표시가 가능하다. 실제로 개수로 상류(upstream)에 위치해 있는 유속계의 유속이 토크 및 RPM과 같이 표기된다. 보유 기능으로 액츄에이터 on/off, 저장 파일명 입력 및 수정, 실험 전 테스트 운영 모드 지원, 데이터 저장 모드 지원, 획득 주기 확인(Hz 단위), 긴급상황을 위한 정지, 일정 시간 저장, 그리고 일정 용량 저장 기능이 있다. 출력 실험 중 소프트웨어의 화면 예시는 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

상기 설명한 바와 같이 실험 장치와 계측 시스템이 자동화 되어

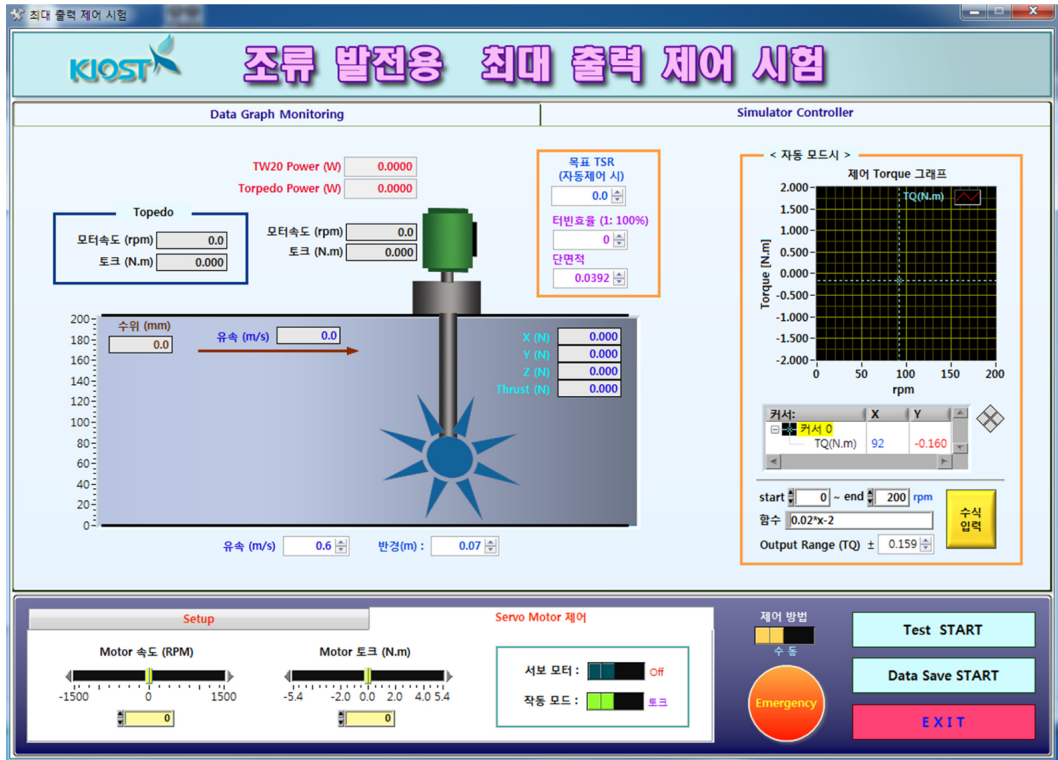


Fig. 6. Software of power extracting experiment.

있어 빠르고 정확한 실험 수행에는 장점을 가지고 있으나, 부하를 모터의 일정한 역 토크(inversed torque)로 주어지는 환경이라 터빈의 순간 토크가 역 토크보다 작아지는 순간에 역 회전이 되어 출력 실험이 중지되는 한계점도 가지고 있다고 할 수 있다. 이에 대한 보완으로는 모터에 의한 부하를 터빈 토크 변동성에 맞추는 방법이나, 브레이크 또는 동적 댐퍼(dynamic damper)를 사용하는 방법이 있어 차후 수정 적용을 고려하고 있다.

터빈에 의해 생성된 순시 출력은 터빈의 각속도(ω)와 이에 작용하는 토크(T)의 곱과 동일하다. 여기서 각속도는 계속된 RPM를 변환하여 구해진다. 다리우스 터빈에서는 토크와 각속도가 일정하지 않기 때문에 출력 역시 일정하지 않은 특성이 있다. 따라서 주기 당 평균 출력은 식 (1)과 같이 주기 내 순시 출력(각속도와 토크의 곱)의 평균으로 아래와 같이 계산된다.

$$P = \frac{\sum_i (T_i \cdot \omega_i)}{N}, \quad (1)$$

여기서 N 은 주기당 데이터 개수이다. 이 때 효율은 최대 추출 가능한 유효에너지 대비 평균 출력으로 아래와 같이 계산된다.

$$\eta = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3}, \quad (2)$$

여기서 A 는 터빈의 통수 단면적이며, 터빈 직경과 높이의 곱과 동일하다. V_{∞} 는 입사 유효 속도로 계속 유속의 평균값이 사용되며 ρ 는 원거리 경계 조건에서의 유체 밀도로 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 이 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

피치각이 0 도로 고정되는 첫 번째 다리우스 터빈은 DT1으로, 가변 피치각을 갖는 두 번째 다리우스 터빈은 DT2, 그리고 가변 피치각과 가변 캠버 크기를 갖는 세 번째 터빈은 DT3으로 명기한다. 또한 한계 피치각의 크기는 P 뒤의 숫자로 표기한다. 개수로의 경우 개문의 정도에 따라 유속이 결정되며 평균유속 0.625 m/s 와 0.725 m/s 조건에 대해 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 개수로의 최대 유속은 1 m/s 이나 가변 구조의 안전성을 위해 다소 낮은 유속 조건을 사용하게 되었다. 실증에 사용된 수직축 터빈의 가동 유속이 1.4 m/s 임(Han *et al.*[2013])을 감안하면 1/2~1/3 정도의 유속 조건에 해당된다. 가변 형상 터빈(DT2와 DT3)의 경우 4, 6, 8, 그리고 10도로 한계 피치각을 설정하고 실험을 수행하였다.

3.1 DT1과 DT2 실험결과

먼저, 상기 두 유속에 대한 고정 피치와 가변 피치 다리우스 터빈의 효율을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(하)를 보게 되면 최대 효율이 Betz limit(59.3%)를 넘는 것을 확인할 수 있다. 최근 연구에서 폭 기준 50%와 25% 폐색률(blockage ratio)을 갖는 다리우스 터빈의 경우 Betz limit 이상의 효율을 보임을 발표한 바 있어(Consul *et al.* [2013]) 이는 폐색효과(blockage effect)에 의한 것으로 판단된다. 본 실험의 경우 폭 기준으로 50% 정도의 폐색률을 가지고 있으며 면적 기준으로는 25% 정도의 폐색률을 가지고 있다.

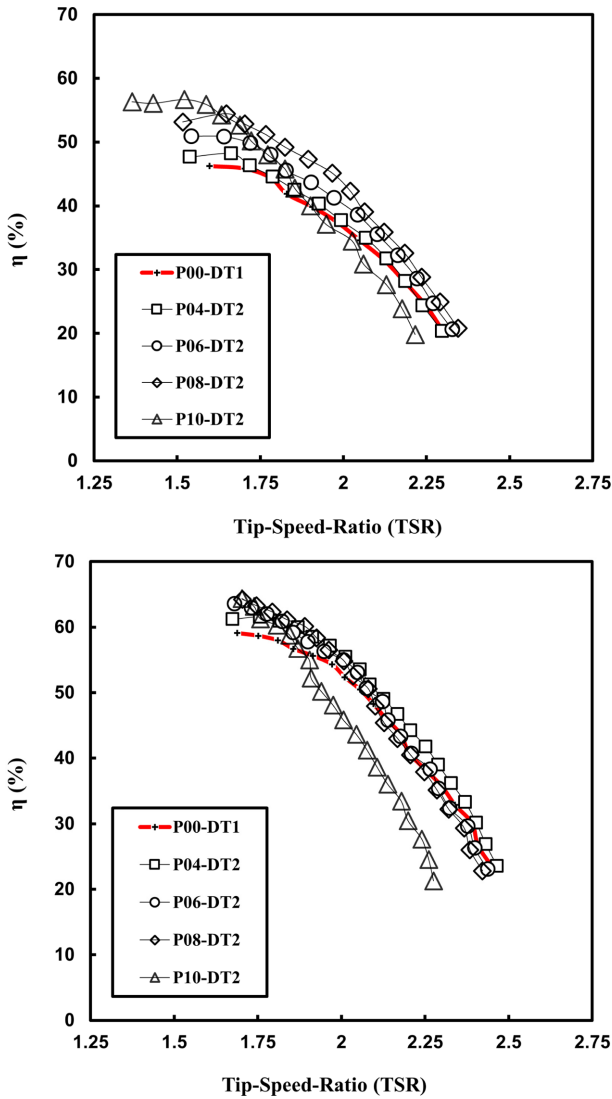


Fig. 7. Efficiencies of fixed pitch and variable pitch Darrieus turbines (Top: 0.625 m/s, Bottom: 0.725 m/s).

Fig. 7의 결과를 보면 두 유속에 대해서 가변 피치 터빈의 경우가 명확한 효율 향상과 함께 TSR(tip speed ratio)이 왼쪽(작은 값)으로 이동함을 확인할 수 있다. 또한 유속의 증가에 따른 효율 향상 효과도 확인할 수 있다.

더 자세히 살펴보면 0.625 m/s의 경우 한계 피치각 크기 증가에 따른 효율 향상과 8도와 10도간 TSR의 왼쪽 이동을 명확히 확인할 수 있었고 0.725 m/s 경우 4도와 다른 각도간 효율 차이와 8도와 10도간 TSR 왼쪽 이동이 명확하게 나타났다. 또한 주어진 조건에서는 한계 피치각이 10도인 경우가 고정 피치와의 차이점이 가장 잘 드러났다. 선행 CFD 연구(Sheng *et al.*[2012])에서는 가변 피치인 경우 10도 한계 피치각에 대해서만 해석 수행을 하였고, 효율 향상과 함께 TSR의 왼쪽 이동 결과를 보였다. 선행 실험 연구(Lazauskas and Kirke[2012])에서는 가변 피치의 경우 10도, 20도, 그리고 30도 한계 피치각에 대해서 실험을 수행하였고 효율 향상과

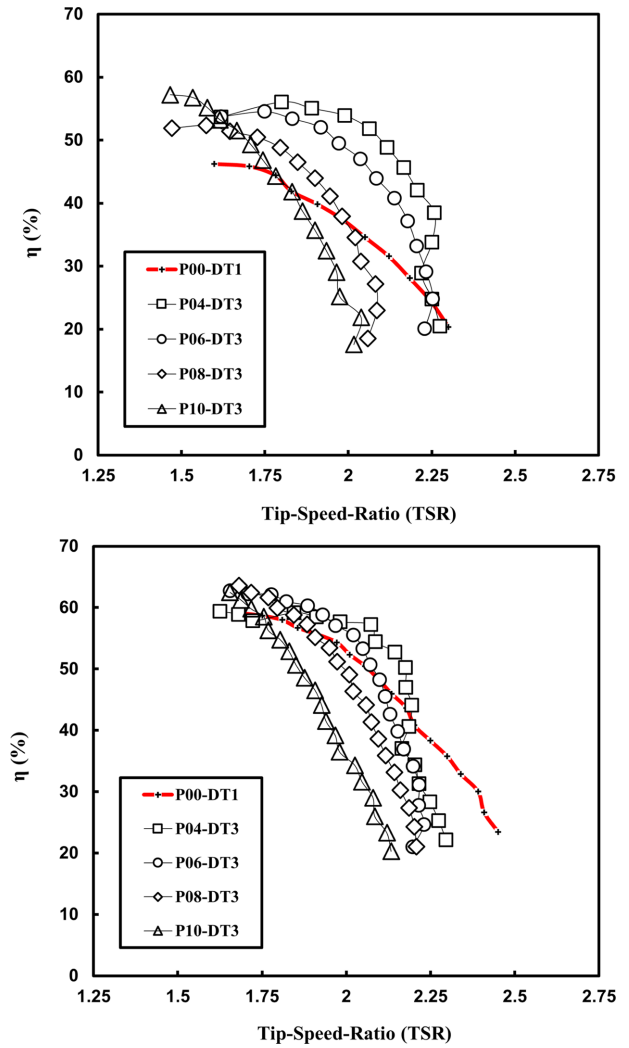


Fig. 8. Efficiencies of fixed pitch and variable pitch-camber Darrieus turbines (Top: 0.625 m/s, Bottom: 0.725 m/s).

함께, 최대 효율을 보이는 최적 TSR을 포함하여 전반적인 TSR 왼쪽 이동 결과를 확인하였다. 반면 한계 피치각이 10도에서 20, 또는 30도로 증가하는 경우 최대효율 및 최적 TSR이 거의 유사하였다. 따라서 두 가지 접근법의 선행 연구 결과와 본 연구의 결과의 경향이 유사함을 확인할 수 있었다.

3.2 DT1과 DT3 실험결과

상기 두 유속에 대한 고정 피치와 가변 피치-캠버 다리우스 터빈의 효율을 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8의 결과를 보면 두 유속에 대해서 가변 피치와 유사하게 가변 피치-캠버 터빈의 경우가 명확한 효율 향상과 함께 TSR이 왼쪽(작은 값)으로 이동함을 확인할 수 있다. 또한 가변 피치와 유사하게 유속의 증가에 따른 효율 향상 효과도 확인할 수 있다.

더 자세히 살펴보면 한계 피치각 증가에 따른 TSR의 왼쪽 이동 경향은 명확하게 확인할 수 있었고, 효율 향상 효과는 0.625 m/s 유속에서 8도로부터 10도로 변경되는 경우에, 0.725 m/s 유속에서 4

도로부터 다른 한계 피치각으로 변경되는 경우에 확인할 수 있었다. 또한 가변 피치와 유사하게 한계 피치각이 10도인 경우가 고정 피치와의 차이점이 가장 잘 드러났다. 선행 연구의 경우 동일한 메커니즘의 수리 실험 결과를 찾아보기 어려웠고, 유사 CFD 연구 결과들이 있었다. 먼저 NACA4512와 NACA7512 고정 캠버 블레이드를 사용하는 경우 NACA0012 대칭 블레이드에 비해 효율 향상과 TSR 왼쪽 이동 결과를 보인 선행연구 (Qamar and Janajreh[2017])와 함께, 가변 캠버를 갖는 경우 캠버의 크기 증가에 따라 효율 향상을 확인한 최근 선행연구(Drias *et al.*[2018])가 가장 근접한 연구 결과라 할 수 있다. 근접성은 있지만 접근방법 혹은 조건이 다소 다른 관계로 선행 연구와 정확한 비교 평가는 어려운 상황이지만, 효율 향상과 TSR 왼쪽 이동 경향은 유사하게 나타난 것으로 확인 할 수 있었다.

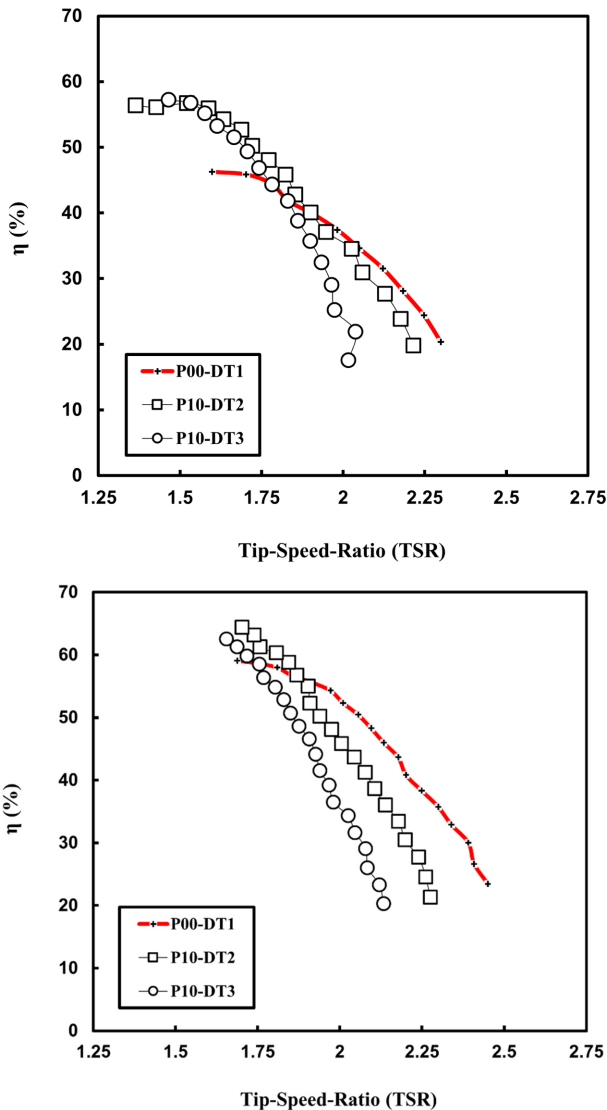


Fig. 9. Efficiencies of fixed pitch, variable pitch (10 degrees) and variable pitch-camber (10 degrees) Darrieus turbines (Top: 0.625 m/s, Bottom: 0.725 m/s).

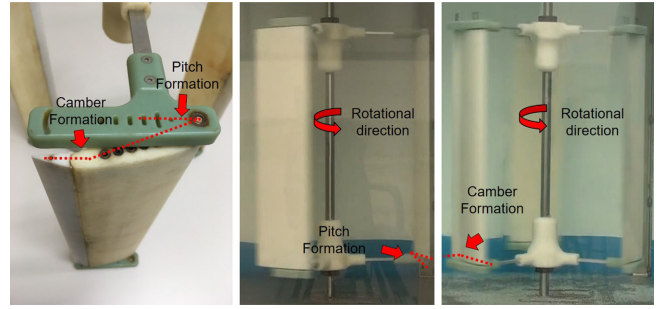


Fig. 10. Pitch and camber formation in the prototype(left); pitch formation of variable pitch turbine (middle) and camber formation of variable pitch-camber turbine (right) during experiments.

3.3 DT1, DT2, 그리고 DT3 간 상대 비교

앞서 기술한 바와 같이 선행 연구들에서 주로 사용된 한계 피치각은 10도(Hantoro *et al.*[2011], Sheng *et al.*[2012], Lazauskas and Kirke[2012])이며 10도 이상에서 최대 효율은 거의 비슷한 수준으로 보고되었다(Lazauskas and Kirke[2012]). 또한 본 연구의 경우도 10도일 때 효율과 TSR 측면에서의 차이점이 명확히 드러났기에 Fig. 9에 한계 피치각 10도를 갖는 가변 형상 터빈들과 고정 피치 터빈의 효율을 도시하였다.

Fig. 9를 보면 가변 형상 터빈들이 고정 피치 터빈 대비 확인한 효율 향상을 확인할 수 있고 이와 더불어 낮은 TSR로의 이동을 볼 수 있다. 또한 가변 피치-캠버의 TSR이 더 낮은 값으로 이동하는 것도 확인할 수 있다. 이는 가변 피치와 가변 캠버 효과가 중첩되어 이러한 TSR 이동 경향이 나타난 것으로 판단된다.

최고 효율을 보이는 최적 TSR이 낮다는 것은 최적 운용 조건에서 상대적으로 낮은 TSR을 갖게 되므로 안전성 향상이나 캐비테이션(cavitation)의 낮은 발생률을 기대 할 수 있게 된다. 따라서 가변 피치-캠버에 의해 복잡성(complexity)은 증가하는 반면 터빈의 전반적인 성능이 향상될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 10에 나타난 바와 같이 제작된 프로토타입을 이용한 터빈 출력 실험 중에 피치와 캠버 형성을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서 다리우스 유동 터빈의 성능 향상을 위해 가변 형상 블레이드를 구현하고 실험적 연구를 통해 성능 평가를 해 보았다. 가변 형상으로 가변 피치와 가변 피치-캠버 두 가지를 구현하였고 특히 가변 피치-캠버의 경우는 항공기의 플랩(flap) 구조를 기반으로 메커니즘을 고안하여 프로토타입을 제작하였다.

수리 실험은 개수로에서 진행되었고 두 가지 유속(0.625 m/s와 0.725 m/s) 조건에서 토크와 분당 회전수 계측치를 이용하여 효율이 도출되었다. 실험계측 결과, 가변 피치와 가변 피치-캠버 두 가지 경우 모두 한계 피치각 10도에서 고정 피치와의 차이점이 확연히 나타났으며 효율은 증가하고 낮은 TSR(tip speed ratio)로 이동하는 터빈의 성능 향상을 확인할 수 있었다. 가변 피치와 가변 피치-캠버

간 비교에서는 효율은 유사한 수준이었으나 가변 피치-캠버의 TSR 이 더 낮은 값으로 이동하였고 이는 피치와 캠버 중첩 효과에 기인한 것으로 판단된다.

본 실험 연구를 통해 가변 형상 블레이드 터빈의 성능 향상 가능성을 확인할 수 있었고 향후 연구에서는 폐색효과(blockage effect)와 스케일효과(scale effect)를 최소화 할 수 있는 수조 시설 또는 실증 센터에서 1/2~1/5 축척의 터빈 프로토타입을 이용한 수리 실험을 통해 실용적인 결과를 도출하고자 한다.

후 기

이 논문은 2018학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Beri, H. and Yao, Y., 2011, Effect of camber airfoil on self-starting of vertical axis wind turbine, *J. Environ. Sci. Technol.*, 4(4), 302-312.
- [2] Consul, C.A., Willden, R.H.J., and McIntosh, S.C., 2013, Blockage effects on the hydrodynamic performance of a marine cross-flow turbine, *Philos. Trans. R. Soc.*, 371, 1985.
- [3] Drias, N.T., Bouzaher, M.T., Lalmi D., Guerira, B. and Eddine, D.D., 2018, Impact of flexible blades on the vertical axis tidal turbine performances, *Modell. Meas. Control B*, 87(1), 36-41.
- [4] Hantoro, R., Utama, I.K. Erwandi, A.P. and Sulisetyono, A., 2011, An experimental investigation of passive variable-pitch vertical-axis ocean current turbine, *ITB J. Eng. Sci.*, 43(1), 27-40.
- [5] Han, S.-H., Park, J.-S., Lee, K.-S., Park, W.-S., Yi, J.-H., 2013, Evaluation of vertical axis turbine characteristics for tidal current power plant based on in situ experiment, *Ocean Eng.*, 65, 83-89.
- [6] Hyun, B.S., Choi, D.-H., Han, J.S. and Jin, J.-Y., 2012, Performance analysis and design of vertical axis tidal stream turbine, *J Shipping Ocean Eng.*, 2, 191-200.
- [7] Jing, F., Sheng Q. and Zhang, L., 2014, Experimental research on tidal current vertical axis turbine with variable-pitch blades, *Ocean Eng.*, 88(15), 228-241.
- [8] Kirke, B.K., 2016, Tests on two small variable pitch cross flow hydrokinetic turbines, *Energy Sustainable Dev.*, 31, 185-193.
- [9] Kirke, B.K. and Lazauskas, L., 2008, Variable Pitch Darrieus Water Turbines, *J Fluid Sci. Technol.*, 3(3), 430-438.
- [10] Kirke, B.K. and Lazauskas, L., 2011, Limitations of fixed pitch Darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch, *Renew. Energy*, 36(3), 893-897.
- [11] Lazauskas, L., and Kirke, B.K. 2012, Modeling passive variable pitch cross flow hydrokinetic turbines to maximize performance and smooth operation, *Renew. Energy*, 45, 41-50.
- [12] Paillard, B., Hauville, F. and Astolfi, J.A., 2013, Simulating variable pitch crossflow water turbines: A coupled unsteady ONERA-EDLIN model and streamtube model, *Renew. Energy*, 52, 209-217.
- [13] Qamar, S.B. and Janajreh, I., 2017, Investigation of effect of cambered blades on Darrieus VAWTs, *Energy Procedia*, 105, 537-543.
- [14] Sheng, Q, Khalid, S.S., Xiong, Z., Sahib, G and Zhang L., 2013, CFD simulation of fixed and variable pitch vertical axis tidal turbine, *J Mar Science Appl.*, 12(2), 185-192.

Received 28 September 2018

1st Revised 31 October 2018, 2nd Revised 15 November 2018

Accepted 3 December 2018