

수동적 날개 조정을 위한 캠 구조 적용 수중 물레방아의 설계 및 제작

김선재¹, 유지함¹, 조용우²

¹한국과학기술원 부설 한국과학영재학교, ²서울과학고등학교

Design and Development of an Underwater Watermill with Cam Orientation for Passive Blade Pitching System

Sunjae Kim¹, Jihahm Yoo¹, Yongwoo Cho²

¹Korea Science Academy of KAIST, Busan, Korea

²Seoul Science High School, Seoul, Korea

요약 캠 구조와 수동적 날개 조정 시스템을 이용한 물레방아는 물 안에 전부 잠겨도 돌림힘이 작용해 에너지를 생산할 수 있다. 본 연구에서는 캠 구조와 수동적 날개 조정 시스템이 적용된 물레방아의 에너지 생산량과 기존 방식 대비의 환경적 이득을 탐구하였다. 먼저 간단화 시뮬레이션을 통해 본 연구의 물레방아가 수중에서 회전할 수 있음을 검증하였고, Fusion 360 프로그램을 통해 모델링하였다. 이후 초기 버전으로 3-Flat Version을 제작한 후, 날개 수와 날개 모양을 수정해 최종적으로 4-Flat Version과 4-Curved Version의 두 물레방아를 제작하였다. 제작된 두 물레방아를 Endless Pool과 직접 제작한 실험 환경에서 실험해 외부 유속 vs. 평균 각속도 vs. Power 데이터를 획득한 결과, 본 연구의 물레방아가 기존 물레방아가 발전하지 못하던 환경에서도 큰 수준의 에너지를 생산할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 현재 수중 에너지 발전 방식으로 많이 이용되고 있는 Underwater Windmill과 비교해도, 본 연구의 물레방아가 환경적인 측면에서 큰 이점을 가짐을 검증하였다. 향후 연구에서 본 장치의 마찰 최소화(자기 부상), 캠 구조의 개선, 그리고 대형화를 통해 본 연구의 물레방아의 발전량을 유의미하게 증가시킬 수 있을 것으로 기대한다.

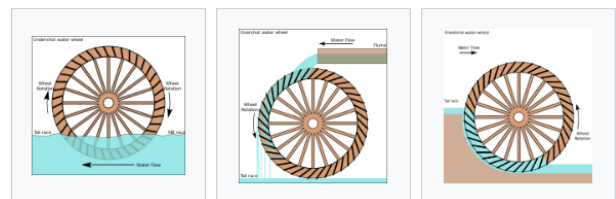
Abstract The waterwheel equipped with a cam structure and a passive wing adjustment system can produce energy even when fully submerged in water due to the action of rotational force. In this study, the energy production of the waterwheel equipped with the cam structure and passive wing adjustment system was investigated, along with the environmental benefits compared to conventional methods. Initially, the waterwheel's ability to rotate underwater was verified through simplified simulations, and the model was designed using Fusion 360 software. Subsequently, an initial version, the 3-Flat Version, was fabricated and further modified in terms of the number and shape of the wings. Finally, two waterwheel versions, the 4-Flat Version and the 4-Curved Version, were produced. Experiments were conducted using the fabricated waterwheels in an Endless Pool and a testbed constructed at the school to acquire data on external flow rate vs. average angular velocity vs. power. The results revealed that the waterwheel in this study could produce a substantial amount of energy even in environments where conventional waterwheels could not, and when compared to the widely used underwater windmill for underwater energy generation, it exhibited significant environmental advantages. Future research is expected to focus on minimizing friction (magnetic levitation), improving the cam structure, and scaling up the device, aiming to significantly increase the waterwheel's power generation capacity.

Key Words : Underwater Watermill, Cam, Passive Blade Pitching System, Energy Harvesting

1. Introduction

친환경적이면서 동시에 유의미한 발전을 할 수 있는 에너지 하베스팅 방식은 흔하지 않다. 현존하는 수력 발전 시스템은 빠른 유속을 요구하거나, 큰 수위 차를 요구하는데, 해당 두 조건이 만족되지 않는 환경에서는 인위적으로 댐을 설치하여 수력 발전을 가능케 하기도 한다. 이러한 기존 수력 발전 시스템은 환경적인 면에서 좋지 않다는 평가를 받고 있다.

물레방아는 댐과 같은 수력 발전 방식과 비교했을 때 24시간 발전이 가능하고, 비교적 친환경적이라는 큰 장점을 가지고 있다. 다만 기존의 물레방아는 그 구조와 관계없이, 반드시 일부분이 물에 잠겨야만 한다는 단점을 지니고 있다. 그림 1에 나타난 대표적인 형태의 물레방아들 모두 물의 흐름이 균일할 때 일부분이 잠겨서 토크를 얻는 방식을 이용하고 있다.



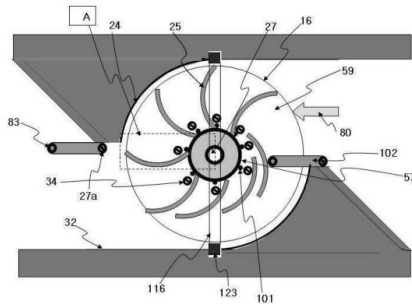
[Fig. 1] 물레방아의 회전 원리, 왼쪽부터 Undershot water wheel, applied for watermilling since the 1st century BC / Overshot water wheel, applied for watermilling since the 1st century BC / Breastshot water wheel, applied for watermilling since the 3rd century AD

따라서 기존의 물레방아는, 물레방아가 물에 전부 다 잠긴 상황에서는 돌림힘이 작용하지 않아 에너지를 생산할 수 없다는 큰 단점을 지닌다. 이는 물레방아의 설치를 어렵게 하고, 환경적 변수가 발생했을 시 수선이 까다로우며, 조경을 해치는 원인이 된다. 본 연구에서는 물레방아에 캠 구조와 수동적 날개 조정 시스템을 적용해, 물에 전부 다 잠긴 상태에서도 에너지 생

산을 가능하게 하여 기존 물레방아의 단점을 해결하고, 친환경적이면서 효과적인 수중 에너지 발전 방식을 제시하고자 한다.

2. Background Study

2.1 기존 접이식 날개를 이용한 수력 발전 모델



[Fig. 2] 대한민국 특허청에 등록된 특허 10-2010-0027024, 접이식 날개 수차

위의 접이식 날개를 이용한 수력 발전 모델은 유도판을 사용하여 날개를 접어 토크의 차이를 발생시켜 발전을 하는 방식이다. 해당 모델은 날개들이 유도판에 충돌을 하면서 날개가 접히는 방식으로 설계를 하였다. 양쪽에 설치된 유도판은 복류식으로 발전이 가능하도록 설계되었고, 저 유속, 저 낙차에서도 높은 효율로 발전할 수 있도록 설계되었다.

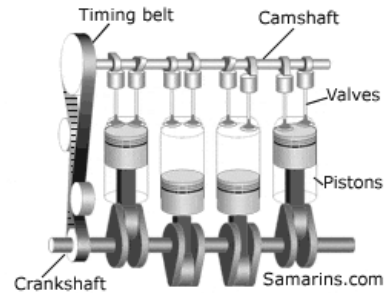
2.2 펄슨 터빈



[Fig. 3] 펄슨 터빈

펠톤 터빈은 물을 노즐로부터 분출시켜 위치 에너지를 운동에너지로 바꾸는 수차로 충돌형 수차이다. 수압에 의해 버킷에 부딪히는 물의 힘으로 회전력을 발생시킨다. 유량을 조정할 수 있는 기구를 갖추고 있고, 유량조정이 최우선 되는 경우에 사용할 수 있다. 펄슨 수차는 단류식 수차이다.

2.3 캠 샤프트 구조(Cam Shaft Structure)



[Fig. 4] Cam Shaft 구조

캠 샤프트는 내부 연소 엔진의 작동을 제어하는 중요한 부품 중 하나로, 밸브의 개방과 폐쇄를 조절하여 연소 과정을 조절한다. 카메라 샤프트는 엔진 블록 내부에 위치하며, 엔진의 크랭크 샤프트와 동기화하여 작동한다.

캠 샤프트는 여러 개의 커브 또는 로브로 구성되어 있으며, 이 커브들은 밸브의 개방과 폐쇄 시기를 결정한다. 엔진 작동 시, 크랭크 샤프트의 회전과 함께 카메라 샤프트도 회전하게 되며, 각 로브의 모양과 크기에 따라 밸브가 열리고 닫히는 타이밍이 결정된다.

캠 샤프트는 크게 흡기 밸브와 배기 밸브의 작동을 제어하는 두 가지 유형으로 나뉜다. 인테이크 샤프트는 연료와 공기가 실린더 내부로 흡입되는 과정을 제어하며, 익스테이크 샤프트는 연소 후 배기 가스가 실린더에서 배출되는 과정을 제어한다.

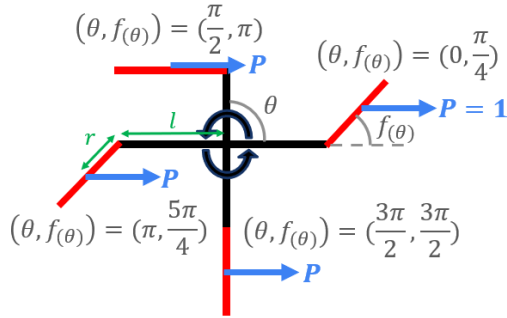
2.4 수동적 날개 조정을 위한 캠 구조 적용 수중 물레방아의 회전 원리

본 연구에서 제작한 수동적 날개 조정을 위한 캠 구조 적용 수중 물레방아는 2.1의 접이식 날개와 2.3의 캠 샤프트 구조를 중심으로 이용한다. 기울어진 날개들을 통해 균일한 유속에서도 토크를 발생시키는 것이 본 연구의 물레방아의 기본 원리인데, 캠 구조를 통해 날개가 기울어지는 각도를 자유자재로 제어하여 이를 실현하였다.

3. 간단화 시뮬레이션

3.1 토크 방정식 유도

본 절에서는 수동적 날개 조정을 위한 캠 구조 적용 수중 물레방아의 적용 가능성을 간단화 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다.



[Fig. 4] 간단화 시뮬레이션, 물레방아 구조와 상황

위 그림 4는 물이 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르는 상황에서의 물레방아 상황을 나타낸 그림이다. 원래 물의 흐름을 고려해 각 날개에 작용하는 힘의 크기를 구해야 하지만, 본 간단화 시뮬레이션에서는 각 날개에 크기 1의 압력이 중심에 균일하게 작용한다고 가정한다. 이때 물레방아와 날개를 잇는 부분의 각도를 θ 라 정의하고, 날개의 각도를 $f(\theta)$ 라 정의하자. θ 의 범위에 따른 $f(\theta)$ 의 크기는 아래의 수식을 만족한다.

$$\begin{aligned} 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} &\Rightarrow f(\theta) = \sin\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \\ \frac{\pi}{2} \leq \theta < \frac{3\pi}{2} &\Rightarrow f(\theta) = \sin\left(\frac{3\theta}{2} - \frac{3\pi}{4}\right) \\ \frac{3\pi}{2} \leq \theta < 2\pi &\Rightarrow f(\theta) = \sin\left(\frac{\theta}{2} + \frac{3\pi}{4}\right) \end{aligned}$$

[Fig. 5] θ 의 범위에 따른 $f(\theta)$ 의 크기

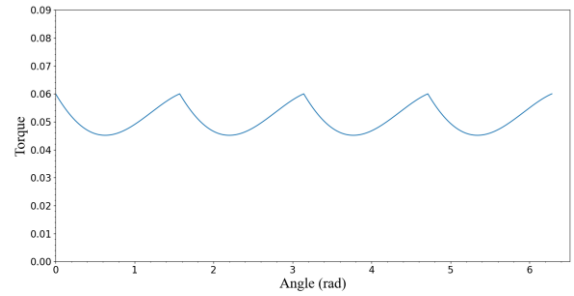
따라서 날개의 개수가 4개인 상황에서 물레방아가 받는 토크는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \tau = l \times &\left(\sin(\theta) + \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) + \sin(\theta + \pi) + \sin\left(\theta + \frac{3\pi}{2}\right) \right) \\ &+ r \times \left(f(\theta) + f\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) + f(\theta + \pi) + f\left(\theta + \frac{3\pi}{2}\right) \right) \end{aligned}$$

[Fig. 6] 유도된 토크 방정식

3.2 시뮬레이션 결과

그림 6의 토크 방정식을 그래프로 나타내면 아래와 같다.



[Fig. 7] 한 바퀴 회전 동안 4-Flat 물레방아가 받는 토크

한 바퀴를 회전하는 동안 물레방아가 받는 토크의 방향이 일정함을 그림 7을 통해 확인할 수 있다. 따라서 저항만 충분히 작다면, 본 연구의 물레방아는 충분히 회전할 수 있어서 에너지를 생산할 수 있음이 예측되었다.

3.3 간단화 시뮬레이션을 통한 날개 수 최적화

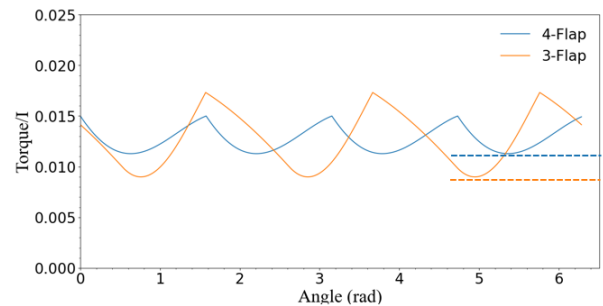
이후 서술할 제작과정에서 우리는 먼저 3-Flat Version을 제작하였다. 3-Flat Version의 경우 잘 회전을 확인하였으나, 날개 수가 3개인 것이 과연 최적인지에 대한 의문이 들어 시뮬레이션을 통해 최적의 날개 수를 탐색하고자 하였다. 날개 수는 자리의 협소함 때문에 5개 이상이 불가하여, 3개의 날개 수 혹은 4개의 날개 수 중 어느 것이 최적인지 결정하는 것이 중요하였다.

그림 6과 같이 날개의 개수 3개인 상황에서 물레방아가 받는 토크는 아래와 같다.

$$\tau = l \times \left(\sin(\theta) + \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) + r \times \left(f(\theta) + f\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + f\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right)$$

[Fig. 8] 날개가 3개인 경우에 유도된 토크 방정식

3-Flat Version의 물레방아와 4-Flat Version 물레방아의 회전 관성 비는 약 3:4이다. 우리는 토크/회전 관성의 크기를 통해 어떤 날개 수가 가장 최적인지 확인하고자 하였다.



[Fig. 9] 3-Flap과 4-Flap의 Torque/I vs. Angle 그래프

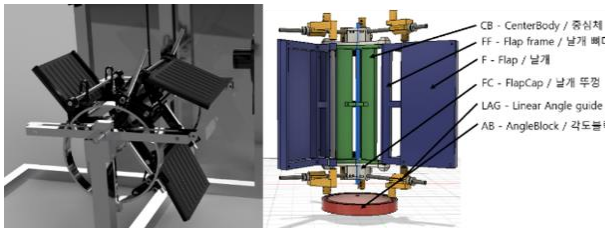
시뮬레이션 결과 한 바퀴를 회전하면서 물레방아가 받는 토크/회전 관성의 크기의 최솟값이 4-Flap Version 일 때 더 큼을 확인하였다.

물레방아는 한 바퀴를 회전하면서 각속도가 빠른 영역을 지나기도 하고, 각속도가 작은 영역을 지나기도 한다. 토크/회전 관성의 최솟값이 작다면, 물레방아가 각속도가 작은 영역을 지날 때 멈출 가능성이 증가한다. 우리의 물레방아가 회전을 멈춘다면, 다시 큰 크기의 유속이 오기 전까지 물레방아는 회전하지 않는다. 따라서 회전을 멈추지 않는 것은, 지속 가능한 발전을 위해 매우 중요한 요소이다. 따라서 토크/회전 관성의 표준 편차가 작고 최솟값이 큰 4-Flap Version이 3-Flap Version보다 최적이다.

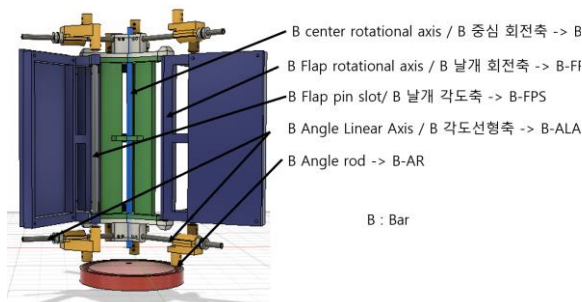
4. Modeling

4.1 물레방아 구조

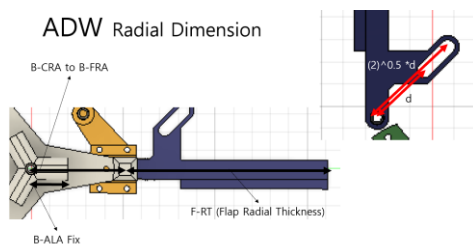
4.1.1 물레방아 개략도



[Fig. 10] 물레방아 개략도, 부품 정의

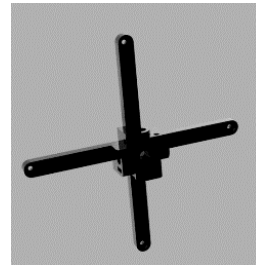


[Fig. 11]: 물레방아 축 정의: AB-AT: Angle Block axial 두께 / FC-AT: flap cap 축 방향 두께 / G-AT: 기어 축방향두께 / LAG-AT: Linear Angle Guide Axial Thickness



[Fig. 12] ADW Radial Dimension. ADW FF에서 Pin-Slot 거리를 기재하였다. (-45~45 변역 기준)

4.1.2 부품 별 설계



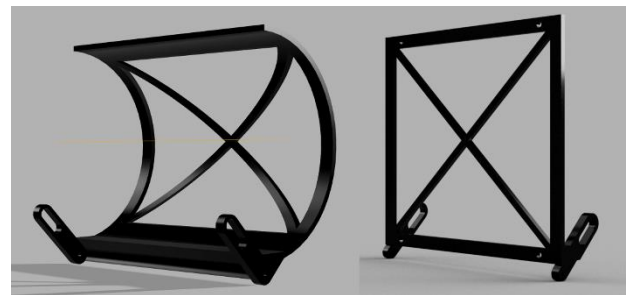
[Fig. 13] Center body

Center body는 로터의 주 회전자로, Flap을 고정하며 회전할 수 있게 한다. 그와 함께 B-ALA를 고정하며 B-CRA위에서 회전한다.



[Fig. 14] LAG (Linear Angle Guide). 26-A : LAG가 조립된 모습. Angle Block에 연결되어 이동하면서 동시에 B-FPS에 연결되어 Flap의 각도를 정한다. 26-B : LAG의 모습.

LAG는 Bearing 방식으로, 철도에서 기차가 이동하듯 AB위를 베어링을 통해 미끄러지듯 이동하며 Flap의 각도를 제어하게 된다.



[Fig. 15] 28-A: Straight Flap, 28-B: StraightFlapWF, 28-C: Half Capsule Flap, 28-D: Full Capsule Flap

5. 물레방아 제작

5.1 전반적인 제작과정

위에 서술한 부품들은 전부 학교 3d 프린터 (Ultimaker 3 Extended, Ultimaker 2)로 제작되었다. 수차의 중심축에는 직경 6mm 카본 파이버 봉을 사용하였고 Flap과 중심의 연결에는 2mm 카본 파이버 봉을 사용하였다. 카본 파이버 봉의 단단하면서도 가벼운 특성은 수차의 경량화에 기여했으며 결과적으로는 수차의 효율을 증가시켰을 것으로 예상된다. 봉들은 다시 부품들과 회전을 위해 베어링으로 연결되고, LAG의 경우 수직적인 움직임을 위해 리니어 부싱과 연결되어 자유로운 수직 움직임을 가지도록 한다. 최종적으로 외부프레임의 경우 수차의 무게를 버티며 Angle Block이 휘지 않게 하기 위해 휘지 않으며 무게를 지탱할 수 있는 알루미늄 프로파일을 사용하였다.

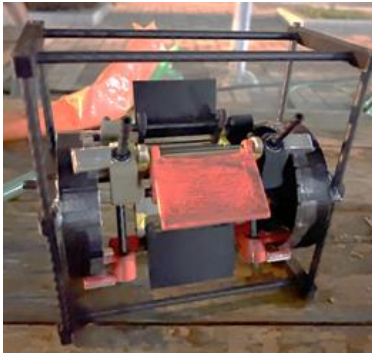
위와 같은 재료들을 사용하여 이와 같은 순서로 제작하였다.

1. Flap과 중앙 프레임의 연결
2. LAG의 연결
3. 중앙축(6mm 봉) 끼우기
4. 외부프레임과 Angle Block 연결
5. Angle Block에 중앙축 끼우기
6. 외부프레임 조립과 길이 조정

앞으로 총 4개의 새로운 모델을 소개하겠지만, 모든 모델은 5.1에 서술된 제작과정을 따랐다.

5.2 Models

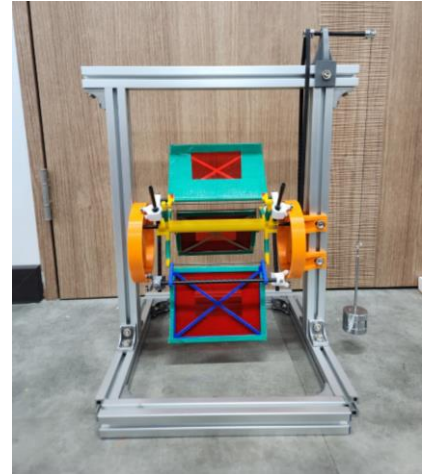
5.2.1 Prototype



[Fig. 16] Prototype

첫째로 만든 Prototype이다. 세 개의 평평한 플랫을 사용하였다. Application의 효율 개선에서 설명된 Magnet model의 방향을 적용하였지만, magnet 방식의 한계점과 저항에 비해 작은 힘으로 인해 회전하지 않았다.

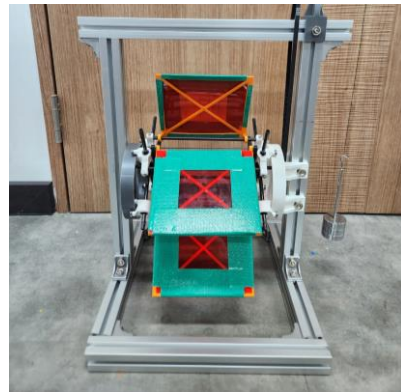
5.2.2 3-Flat Version



[Fig. 17] 3 FLAT MODEL

Test bed에 들어갈 수 있는 최대 크기로 플랩의 크기를 대폭 증가시켜 받는 힘을 늘렸고 Center Frame에 사용되는 필라멘트의 감소, 필라멘트가 채워져 있던 기존 방식에서 틀 위에 셀로판지를 붙이는 방법으로 경량화 시켰다. 또한, 프로토타입과 다르게 3 FLAT MODEL에서는 Magnet 방식이 아닌 Bearing 방식을 택함. 센터바디 일렬이 안되는 문제를 해결하기 위해 외부 프레임을 알루미늄 프로파일로 바꾸기도 하였다. 이 모델의 경우 6.1.1 에서 설명될 자체제작 Test Bed에서 회전을 확인하였다. 처음으로 이론의 검증이 이루어진 모델이다.

5.2.3 4 FLAT MODEL



[Fig. 18] 4 FLAT MODEL

4개의 Flat Flap을 이용한 모델. 시뮬레이션 결과와 정성적 예측을 통해 flap의 개수를 늘리는 편이 효율을 확실히 증가시킬 것이라는 결론을 내렸다. 하지만 flap의 개수를 더 늘렸을 때의 경우에 대해서는 flap 간의 간섭(물의 흐름에 의한), 경제성 측면에서 우려되어 5개 이상은 시도하지 않았다.

5.2.4 4 CURVE MODEL



[Fig. 19] 4 CURVE MODEL

Curved Flap 4개를 사용한 모델. 반원모양의 flap을 사용하게 될 경우, 물로부터 더 큰 에너지를 얻을 것이라는 아이디어에서 발전하여 제작하였다.

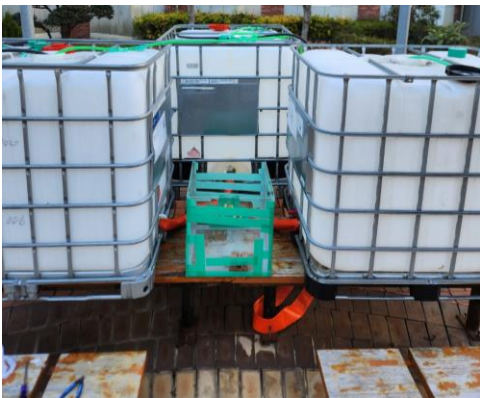
6. Experiment

6.1 실험 장소

실험은 총 두곳에서 진행되었다. 먼저, 접근성이 높은 대신 물의 흐름이 완전히 일정하지 않고 유속이 고정된 직접 제작된 Test bed, 둘째로는 완전히 균일한 유속을 제공하고 이에 더해 유속을 미세 조정할 수 있는 Endless Pool에서 실험을 진행하였다.

6.2.1 자체제작 Test Bed

첫째로 직접 제작한 Test Bed의 형상은 다음과 같다.



[Fig. 20] Test Bed의 모습

직접 제작한 Test Bed는 위와 같이 거대한 수조 세계에서 위치에너지로 인해 호스를 통해 물이 세개의 구멍으로 들어오고 이가 다시 반대편에 있는 여러 개의 작은 구멍을 통해 나오게 되면서 수조 안에서는 한방향으로의 물의 흐름이 발생하게 된다. 수조는 아크릴판을 레이저 커팅기로 자른 후 실리콘칠을 통해서 제작하였다.

6.2.2 Endless Pool

두번째로는 Endless Pool로 이번 연구에 활용된 모델은 Endless Pools사의 Dual propulsion pool이다. Endless Pool은 여러 작은 호스에서 물을 강하게 밀어내기 때문에 매우 균일한 유속이 발생하고, 때문에 실제 환경과 유사하다 생각할 수 있었다. 더 나아가, 엔드리스 풀은 유속을 변화시킬 수 있다는 점에서 큰 강점이 있었다. 하지만 이가 우리의 소유가 아니라는 점에서 시간의 제약과 공간의 제약이 있었다.



[Fig. 21] Endless Pool 사의 Dual propulsion model

6.3 실험 과정

6.3.1 유속에 따른 평균 각속도 측정

앞서 제작한 4 FLAT 모델과 4 CURVE 모델의 효율성을 비교하고, 실제 환경에 가깝다 볼 수 있는 충분히 낮은 유속에서도 제작한 물레방아가 잘 작동하는지를 살펴보기 위해 총 8개의 다른 유속 3, 5, 7, 15, 22, 30, 37, 45 (100이 1:08/100yard)에서 FLAT과 CURVE를 각각 실험해보고 이에 대해 영상을 촬영한 후 평균 각속도를 측정한다.

6.3.2 토크에 따른 평균 각속도

전의 실험으로 4 CURVE가 가장 효율적인 모델임을 확인 후, 이가 얼마만큼의 부하를 걸었을 때 최대 전력을 생산하는지 알아내기 위해 이와 같은 실험을 고안하였다. 물론 가장 이상적으로는 각 부하마다 얼마만큼의 전력을 생산하는지 정확히 알아내는 것이 이상적이지만 이는 현실적으로 어려움이 따르기에 그 대신 우리는 수차에 도르래를 달아 인위적으로 부하를 주고 각 무게마다 돌아가는 각속도를 측정하여 이를 이용해 전력을 예상했다. 아래 식에서 m 은 수차에 가한 추의 무게, r 은 도르래의 반지름.

$$P(W) = mgr\omega$$

이러한 실험은 오랜 시간이 요구되는 특성상 자체 제작된 Test Bed에서 실행되었다.

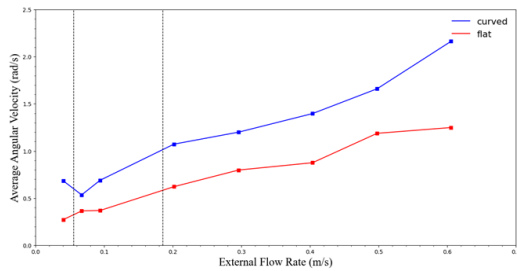


[Fig. 22] 도르래 메커니즘

위와 같이 실에 무게추를 달면 이러한 부하는 Timing Belt를 통해 수차의 중심축에 직접적으로 연결되어 부하를 그대로 전해줄 수 있다. 이러한 추가 물 속에 들어가게 되면 부력의 영향을 받기에 주는 수조 밖으로 빼내서 실험했다. 주는 100g 부터 시작하여 100g 단위로 수차의 회전이 완전히 멈추는 것으로 보일때까지 계속 추의 무게를 추가하여 측정하였다.

7 Conclusion

7.2 유속과 평균 각속도 간의 관계



[Fig. 23] 유속에 따른 평균 각속도의 변화. 파란색은 4 Curve 모델, 붉은색은 4 Flat 모델을 나타낸다.

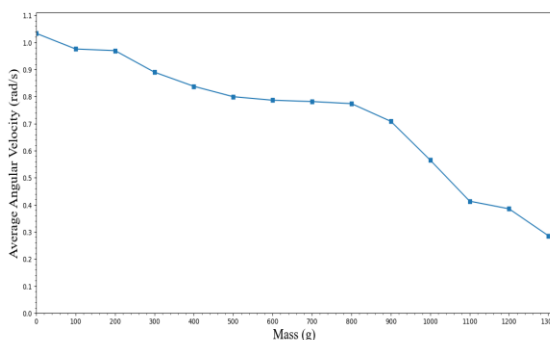
Endless pool에서 진행한 실험으로 몇 가지 유의미한 결과를 도출할 수 있었다.

첫째로, 자체제작 Test bed에서는 확인했던 결과이지만 Endless pool이 구현하는 거의 완전하게 균일한 물의 흐름에서 두 모델 모두 성공적으로 회전하였다.

둘째로, 4 FLAT 모델과 4 CURVE 모델로 8개의 유속에 대한 평균 각속도 비교를 진행한 결과, 유의미하게 curved가 나은 효율을 나타냄을 보일 수 있었다. 반원모양의 flap이 더 큰 힘을 전달할 것이라는 예측이 맞은 셈이다.

셋째로, 유속에 따른 각속도의 관계는 선형으로, 저유속에서도 회전 가능함을 알 수 있었다. 이는 우리의 수중 물레방아가 저유속인 강 (금강: 5.5cm/s, 낙동강: 15.5cm/s) 에서도 충분히 사용될 수 있음을 보여준다.

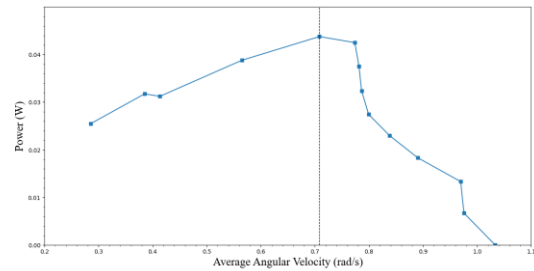
7.3 토크와 평균 각속도 간의 관계



[Fig. 24]: 기한 추의 질량과 그에 따른 평균 각속도의 감소를 나타낸 그래프.

먼저, 최대 1300g의 부하를 걸었을 때까지 회전을 관찰할 수

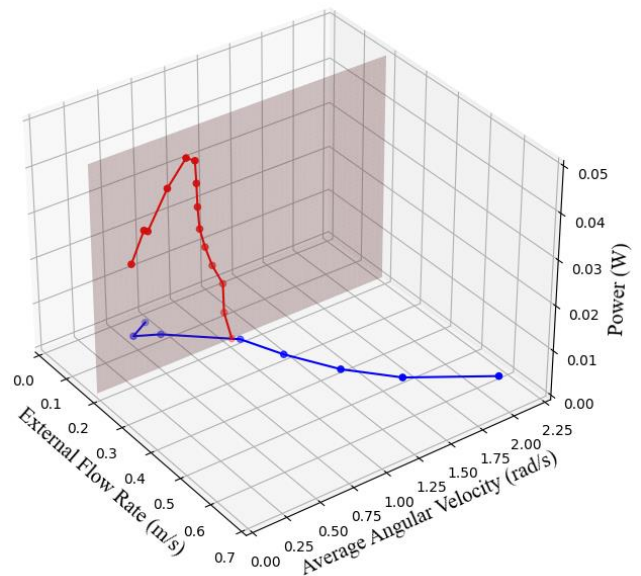
있었고 1400g 부터는 온전한 한 바퀴의 회전이 일어나지 않았다. 때문에 100-1300g 까지의 부하에 대한 평균 각속도를 측정하였는데, 그 결과는 위와 같다.



[Fig. 25]: 평균 각속도와 전력 사이의 그래프로 재구성. 세로 실선은 전력이 최대가 되는 때.

추의 무게(g)와 평균 각속도(rad/s) 사이 관계를 나타낸 그래프를 Power와 평균 각속도 사이의 그래프로 변환하게 되면, 전력과 평균 각속도에 대한 관계를 나타낸 그래프를 얻게 된다. 800g의 부하를 걸었을 때 최대 전력인 0.043W를 수중 물레방아가 생산할 것으로 계산되었다. 즉, 이 조건에서 가장 효율적으로 작동하는 부하는 800g인 것이다. 가장 효율적으로 작동하는 부하는 유속에 따라 변화할 것이기에 이는 어디까지나 Test bed의 유속 (0.19m/s 추정) 에서의 최적화이다. 우리는 특정 유속에서 최대 전력을 생산하는 부하를 찾는 메커니즘을 하나의 유속에서 제시하는 것으로 전력에 대한 분석을 마무리한다.

아래 사진은 두가지 실험에 대한 결과를 3차원 그래프에 plotting한 데이터이다.



[Fig. 26] 유속, 평균 각속도, 전력 사이의 3차원 그래프

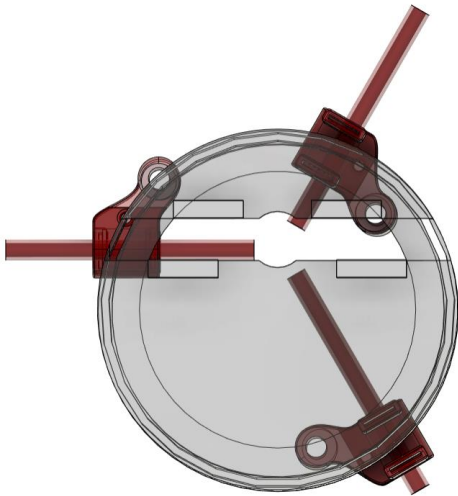
8 Application

8.2 효율 개선

8.2.1 자기부상

Angle Block을 따라 LAG가 베어링을 통해 미끄러지면서 이동하는 방식을 우리는 기존의 Bearing model이라 불렀다. 이러한 방식은 제작에 용의하고 적은 비용을 요구하였지만 그와 동시에 베어링이 오랜 기간 사용시 녹슬 수도 있다는 점, LAG의 베어링과 Angle Block 사이에 마찰이 항상 존재한다는 점이 효율을 감소시키고 있었다.

때문에 여기서 새롭게 제시하는 Magnet model에서는 이러한 약점을 보완한다. Magnet model은 Bearing의 미끄러짐이 아닌 자기부상열차와 같이 LAG가 자석 간의 반발력으로 인해 Angle Block을 따라 미끄러지는 원리이다.



[Fig. 27] Magnet model을 택할 경우 LAG가 Angle Block에 따라 이동하는 모습

이를 적용할 경우, 수차의 가장 큰 자체 저항 발생 원인이었던 Angle Block과의 마찰을 해결한 것임으로 효율을 크게 증가시킬 것으로 기대된다.

하지만 Magnet model로 제작해본 수차들은 오히려 제대로 돌아가지 못하는 모습을 노출했는데 그 원인은 다음과 같다.



[Fig. 28] LAG의 자석과 Angle Block의 자석이 계속해서 붙는 모습

LAG 회전 중 Angle block의 자석과 LAG의 자석이 붙어버리는 문제가 발생한 것이다. 이는 제작 과정에서 연속적인 원형의 큰 자석을 사용한 것이 아닌 이산적으로 여러 개의 자석을 설치하였기에 생긴 문제로 보인다. 원래 의도대로라면, 모든 위치에서 Angle block의 자석은 LAG의 자석에 동일한 척력을 제공하며 자기부상열차와 같은 움직임을 보여야 했지만 이산적으로 배치된 배열은 일정한 척력이 아닌, 어떤 부분에서는 인력을 나타내게 되었고 이러한 문제가 발생하게 되면 회전이 불가능하게 된다. 때문에 본 연구에서는 그 이후 만든 모든 model을 bearing model로 만들게 되었다. 하지만 이를 강자성체로 감쌀 수 있다면 이러한 문제를 해결할 수 있을 것으로 보인다. 외부로 강자성체로 감싼 angle block은 외부에서 안정적인 자기장을 만들어낼 것이고, 때문에 angle block과 lag의 자석 사이에 일정한 척력은 기존의 아이디어였던 자기부상열차와 같은 최소한의 저항을 가능케 할 것으로 보인다.



[Fig. 29]: Angle Block의 강자성체 감싸기를 통한 자기장 안정

8.2.2 Angle Block 최적화

Angle Block의 최적화로도 효율 증가를 꾀할 수 있다. 다음과 같은 개선 방법 최적화를 거쳐야하는 것으로 보인다.

1. 유속에 대한 Flap 각도별 Torque 계산
2. Rotor 각도에 대한 회전속 최대
3. Smoothing (인접 노드 산술 평균 방식)

이는 다변수에 대해 CFD를 돌려야 하기 때문에 많은 계산량을 요구하기에 현실적으로 이번 연구에서는 배제하였다. 하지만 angle block 최적화는 불균형 토크를 최대화하며 더 나은 효율로의 발전을 가능케 할 것이다.

8.2.3 대형화

우리가 도출한 효율은 저항, 최적화 미진행의 원인도 있지만 크기의 문제로 더 많은 전력을 생산하지 못했다. 40cm*40cm*40cm의 크기에 맞춰 제작된 현재의 수증 물레방아는 소형발전기로 규정된 5m*5m*5m의 크기에 한참 덜 미친다. 때문에 소형발전기의 범주에서 벗어나지 않으면서도 크기를 10배 이상 키울 수 있으며 풍력발전기 VAWT (vertical axis wind turbine)에서 진행되었던 선형연구에 따르면 날개의 면적에 비례하여 전력이 생산됨을

우리의 수중 물레방아에 동일하게 적용, 총 100배 이상의 전력량 개선을 할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 유추는 VAWT와 수중 물레방아가 토크를 얻는 방식이 유사하다는 점에서 착안 면적에 비례한다는 사실은 충분히 신뢰 가능한 것으로 보인다.

8.3 기존 방식과의 비교

수중흐름을 사용하여 에너지를 생산하는 방식으로 현재 사용되고 있는 기술은 Underwater windmill, 다른 말로 tidal stream turbine이라 불린다. 우리가 고안한 캡 구조, 수동적 날개 조정 시스템과 이는 차이가 있기에 여기서부터 혼동을 피하기 위해 기존의 방식을 tidal stream turbine이라 부르겠다. Tidal stream turbine은 가장 잘 알려진 형태의 풍력발전기와 동일한 원리를 가지고 물속에서 가동하도록 변형시킨 것이다.

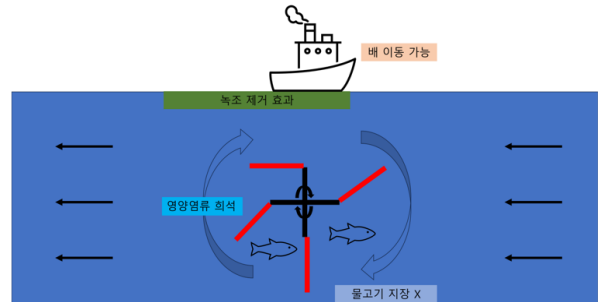


[Fig. 30]: 사용되고 있는 Underwater Windmill
이러한 기존 방식과 비교하여 우리의 수중 물레방아는 강점을 보이는데 이를 서술하겠다.

8.3.1 수중, 수상 환경 분석

가장 주목할만한 점은 수중 물레방아의 긍정적인 환경적 영향이다. 기존 Tidal stream turbine의 약점이 설치된 위치 500m 반경에 있는 수중환경에 악영향을 끼쳤던 것과 달리, 새롭게 개발된 수중 물레방아는 오히려 환경적으로 이득일 것이다. 이는 수중 물레방아가 위아래로 물을 섞어주는 역할을 하기 때문인데, 수중 물레방아의 형태에서 알 수 있듯, 축이 지면과 수평하게 놓여짐으로 인해 수중 물레방아는 물의 수직적 움직임을 발생시킨다. 이는 영양염류의 순환으로 이어지며 녹조 제거로까지 이어지게 된다. 현재 강의 녹조제거를 위해 물순환 장치를 이용하고 있는데, 새롭게 고안된 물레방아는 물순환을 진행시키면서 동시에 에너지를 생산할 수 있는 것이다.

또한, 수중환경에 가해지는 위협에 대해서는 적게 우려된다. 먼저 수중 물레방아는 물 속에서 발전을 위해 부하까지 걸어주게 되면 느린 속도로 회전한다. 그리고 물고기들의 이동방향을 가로막는 것이 아닌 그와 같은 방향으로 회전하고 있기에 아직 검증은 필요하지만 수중 생태환경에 악영향을 최소화할 수 있을 것으로 보인다. 수상환경에 대해서는 배가 위로 자유롭게 지나다닐 수 있기 때문에 경제적 이점 또한 기대된다. 이러한 장점들을 아래의 그림으로 도식화하였다.



[Fig. 31] 환경적 이점의 도식화

또한, 기존 방식이 조석을 이용한 빠른 유속에서 적용되었다면 우리는 앞선 실험을 통해 매우 느린 유속에서도 수중 물레방아가 발전 가능성을 보였다. 때문에 이는 느린 강에서도 친환경에너지를 생산하는 혁신으로 보인다.

9. 결론

본 연구에서는 수동적 날개 조정 시스템을 위한 캡 구조 수중 물레방아를 제작하였다. 제작한 물레방아는 환경적인 면에서, 그리고 에너지 생산적인 면에서 모두 우수하였다. 제작한 4-Curved Version은 43mW의 발전이 가능하였으며, 40cm 스케일에서 10m 스케일로 증가했을 때 26.875W의 전력 생산이 가능할 것으로 추정된다. 또한 본 연구의 물레방아는 수중에서는 해양 생태계에 큰 간섭을 하지 않고, 수상에서는 배의 이동에 간섭을 하지 않는 큰 환경적 이점이 있다. 또한 물을 섞어 녹조를 제거하고 영양염류를 희석시키는 이점도 존재한다.

향후 연구로는 마찰 감소 방법 연구, 캡 구조 최적화, 대형화가 있으며, 이러한 연구들을 통해 발전량을 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Eriksson, S.; Bernhoff, H.; Leijon, M. (2008). "Evaluation of different turbine concepts for wind power". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12 (5): 1419-1434.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport Han River Flood Control Office, Report on Flow Measurement of Han River (Lower Section) and Imjin River Watershed (2000)
- [3] Uihlein, A., & Magagna, D. (2016). Wave and tidal current energy-A review of the current state of research beyond technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1070-1081.

김 선 재(Sunjae Kim)



- 2022년 2월 : 서울 대명중학교 졸업
- 2022년 3월~현재 : 한국과학기술원 부설 한국과학영재학교 재학

<관심분야>
에너지 하베스팅, 시뮬레이션

유 지 함(Jihahm Yoo)



- 2022년 2월 : 서울 역삼중학교 졸업
- 2022년 3월~현재 : 한국과학기술원 부설 한국과학영재학교 재학

<관심분야>
에너지 하베스팅, 응용수학, 수학적 모델링

조 용 우(Yongwoo Cho)



- 2022년 2월 : 서울 서일중학교 졸업
- 2022년 3월~현재 : 서울과학고등학교 재학

<관심분야>
기계공학, 로봇공학, 컴퓨터공학