



연구 진행 보고서

주제

저유속에서 발전 가능한 접이식 날개 수차

1. 서론

A. 연구 배경과 목적

A.1 연구 배경

기존의 수력 발전 시스템은 빠른 유속의 강류나 높은 수위의 물의 에너지를 필요로 한 경우가 많았다. 하지만 이러한 조건을 갖지 않는 지역에서는 댐을 지어 인공적으로 이러한 조건을 만들어야 했다. 또한, 기존의 빠른 유속을 사용하는 수력발전 방식에서 발생하는 경제적 비효율, 환경적인 문제와 생태학적인 영향을 최소화하기 위해서도 저속 유속 지역에서 수력 발전의 가능성을 탐구하는 것이 중요해지고 있다. 따라서 본 연구는 느린 유속 지역에서도 효과적인 수력 발전을 실현하기 위해 접이식 날개와 cam 구조를 활용하여 새로운 발전 형태를 고안하고자 한다. 이러한 새로운 기술은 저속 유속에서 발생하는 환경적 문제를 최소화하면서 지속 가능한 에너지를 생성할 수 있을 것으로 기대된다.

A.2 연구 목적

본 연구는 느린 유속에서도 효과적으로 수력 발전을 가능하게 하는 혁신적인 방법을 개발하고자 한다. 접이식 날개와 cam 구조를 활용하여 터빈 전체를 물에 담 구어 발전을 하는 발전 형태를 연구하고 있다. 이 연구의 주요 목적은 다음과 같다.

1. 느린 유속에서 발전할 가능한 환경 친화적인 수력 발전 기술 개발: 느린 유속 지역에서도 효과적으로 수력 발전을 가능하게 하는 기술을 개발한다. 기존의 수력 발전의 제약을 극복하고 생태학적 보전과 함께 환경 문제를 최소화한다.
2. 지속 가능한 에너지 변환 메커니즘 최적화: FRW 와 ADW 구조 두가지 방식을 구현하여 물의 운동 에너지를 효율적으로 변환하는 메커니즘을 연구하고 최적화한다. 이를 통해 발전 효율을 높이고 지속 가능한 에너지를 생산한다.
3. 경제적인 구축 가능성 평가: 느린 유속 지역에서의 수력 발전으로 지역사회 경제와 생태계 보전에 기여하며, 지속 가능한 발전을 추구한다.
4. 다양한 지역사회에 긍정적인 영향 제고 : 느린 유속 지역에서의 수력 발전 기술을 도입하여 에너지가 부족한 다양한 지역 사회에 긍정적인 영향을 제고한다.

B. 선행연구 및 배경 자료

B.1 선행연구

B.1.1. 기존의 접이식 날개를 이용한 수력 발전 모델

대한민국 특허청에 등록된 특허 10-2010-0027024

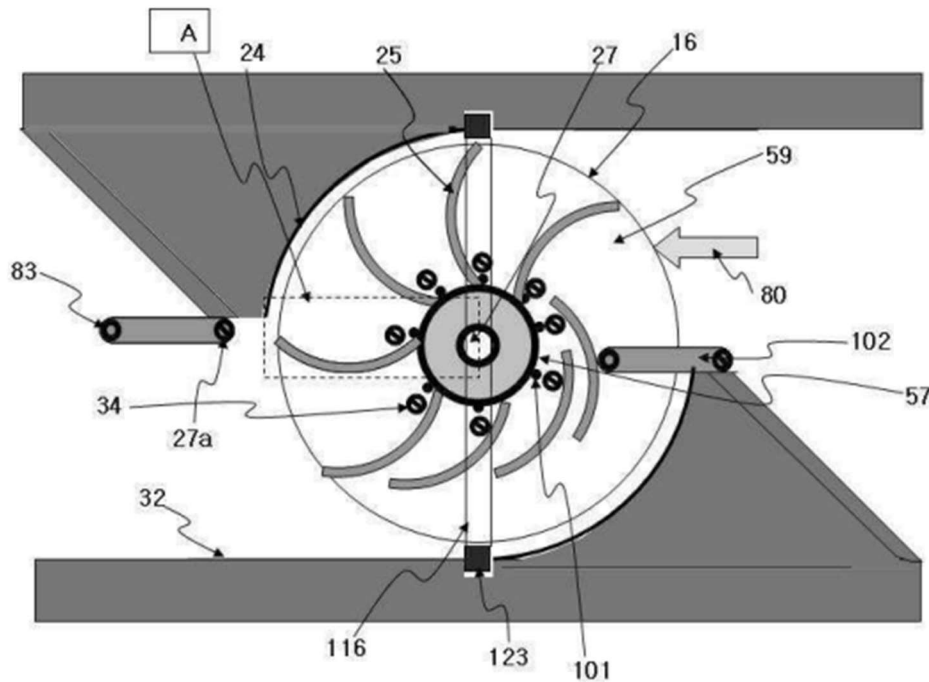


Figure 1 : 수정 날개 접이식 수차의 간략한 구조

기존의 접이식 날개를 이용한 수력 발전 모델은 유도판을 사용하여 날개를 접어 토크의 차이를 발생시켜 발전을 하는 방식이다. 이 모델의 날개들이 유도판에 충돌을 하면서 날개가 접히는 방식으로 설계를 하였다. 양쪽에 유도판을 설치하여 복류식으로 발전이 가능하도록 설계하였고, 저 유속에서 높은 효율을 발전할 수 있도록 설계를 한 모델이다.

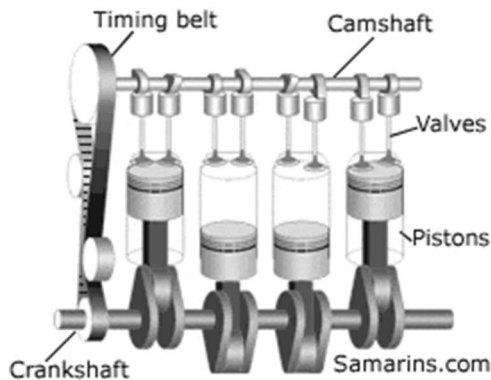
B.2 배경 자료

B.2.1 Pelton Turbin (펠톤 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. 펠톤 수차는 단류식 수차이다.

B.2.2 Cam Shaft (캠 샤프트 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 작동합니다.

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 열고 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. 연구 방법

1. CFD 분석을 사용하여 날개 구조 별 유체의 흐름 분석
 1. CFD로 날개가 받는 힘을 각도별로 측정한다.
2. CFD 데이터를 통한 분석
 1. 날개의 각도 별 힘을 통해 위에서 구한 이론식에 대입하여 각속도를 계산할 수 있다.
 2. ADW에서 얻어낼 수 있는 효율을 계산한다.
3. 흐르는 물에서 터빈의 토크와 회전 수 측정
 1. 수조에 모터를 장착하여 한 방향으로 회전하는 물의 흐름을 만들어낸 다음, 터빈의 회전수를 측정한다.
 2. 터빈과 연결된 프로펠러가 레이저를 차단하여 레이저 신호의 간격을 통해 터빈의 회전수를 구할 수 있다.

3. 연구과정

A.본 연구의 설계

A : 실험 장치 설계

A-1 : 전체 개략도

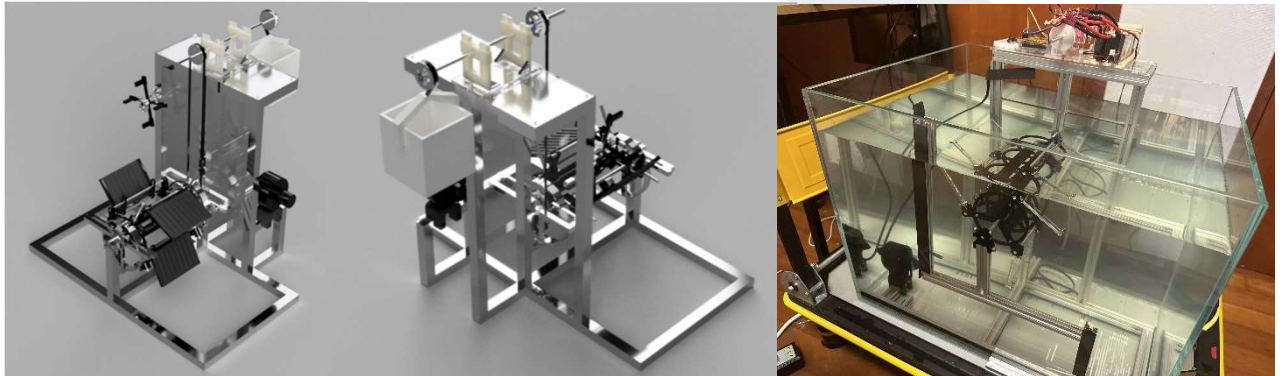


Figure 1 : 실험 장치의 전체 구성. 5-A : 실험 장치의 전체 구성, 어항 없음. 5-B : 실험 장치 구성 후면 5-C : 실험 장치 실제 모습

실험 장치의 목적은 강과 같은 환경을 제어 가능하게 해 실험 장치를 실험 가능하도록 하는 것이다. 물의 직선 흐름을 만들기 위해 물이 내부에서 회전 가능하도록 사이에 칸막이를 설치하였다. 물은 모터를 이용하여 추진되며 유속을 조절할 수 있다. 실험 장치 윗면에 장착된 측정 장치들과 아두이노를 통해 토크, 회전수를 측정할 수 있다.

A-2 : 부분 별 설명

가. 모터 유체 추진

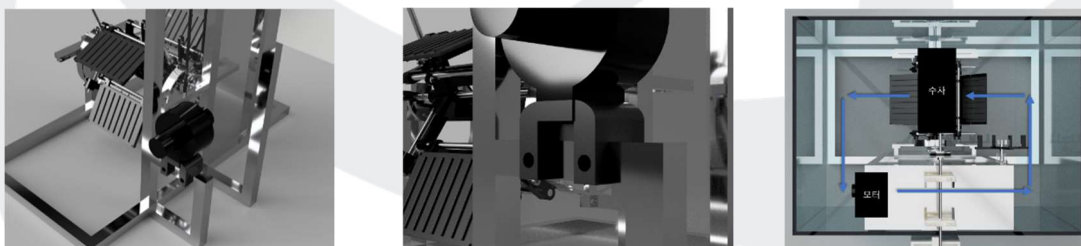


Figure 2 : 모터 유체 추진. 6-A : 알루미늄 프로파일에 모터가 결합된 모습. 6-B : 모터가 모터 마운트를 통해 결합되어 있다. 6-C : 어항의 위에서 바라본 어항 속 유체의 흐름

나. 수차 결합 부

수차는 알루미늄 프로파일에 폭 310mm의 알루미늄 6mm 환봉을 통해 결합된다. 좌측은 20mm, 우측은 10mm의 고정부를 가지며, 베어링을 통해서 회전 가능하게 결합된다. Angle Defined Wheel(ADW)와 Free Rotating Wheel(FRW) 각각을 위한 별도의 수차 결합부가 존재한다.

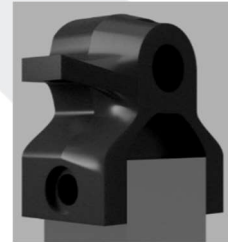
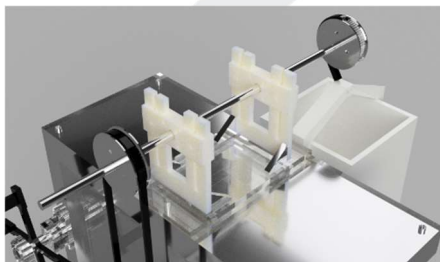


Figure 3 : 수차 결합 부. 7-A: ADW) Angle Block Mount. 7-B: Barmount1, 7-C : Barmount3.

다. 가변 높이 축



회전수를 측정하기 위해 수차의 주 회전축 (B-CRA, Bar-Center Rotational Axis)를 수면 위로 꺼내 주고, 일정한 장력을 제공하기 위해 가변 높이 축이 필요하다. 아크릴 판을 가공해서 만들었으며, 나사를 돌려서 높이를 조절하고 고정할 수 있게 만들었다. 베어링 두 개로 축을 고정한다.

Figure 4 : 가변 높이 축

축의 한쪽은 수차에, 한쪽은 무게추에 연결되어 있어 모멘트암과 무게추의 무게를 이용해서 토크를 구하게 된다. 그리고 회전수를 측정함으로써 걸리는 부하 (토크)에 따른 회전수와 이들의 곱을 통해 얻게 되는 에너지를 계산 할 것이다.

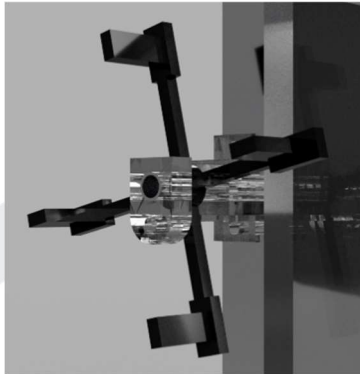
라. 수차 회전 수 측정기 (Wheel Tachometer)



수차 회전 수 측정기는 가변 높이 축에 검은색 아크릴 날개를 단 이후, 레이저 모듈과 CDS 빛 감지 센서 모듈을 이용해 회전수를 측정한다. 다음과 같이 생긴 날개가 1회전시 2번의 레이저 깜빡임을 CDS 빛 감지 센서 모듈에서 감지하고, 아두이노는 이를 1초마다 세어 회전수를 계산하게 된다.

Figure 5 : Wheel Tachometer의 모습. 아크릴 부품에 CDS 하고 레이저 모듈이 부착되어 작동한다.

마. 유속 측정기 (Water Tachometer)



유속 측정기도 마찬가지로 같은 원리를 이용해 구동된다. 레이저 센서와 CDS 빛 감지 센서 모듈을 이용해 회전수를 측정하게 된다. 단, 물에 물레방아와 같은 회전자를 담 구어 물의 속도에 맞추어 회전하게 한다. 이때 수면의 높이에 따라 유속 측정기의 높이를 조절할 수 있게 가변 높이 설계가 적용되어 있다.

Figure 6 : Water Tachometer.

바. 무게 추 가방

무게 추 가방은 토크를 측정하기 위한 장치이다. 들어간 추의 무게를 바꾸어가면서 토크를 바꾸며, 이때 추의 무게와 회전수의 관계를 이용하여 추력을 비교한다.

Figure 5-C에서 무게 추 가방의 모습을 확인할 수 있다.

사. 아두이노 코드

아두이노 코드는 위의 기능을 효율적으로 수행하기 위해서 짜여 있다.

인터럽트 두 개로 Water Tachometer 하고 Wheel Tachometer의 기능을 수행하며, 노트북과 시리얼 통신으로 데이터를 저장한다. 또한, 유속을 원하는 만큼 상승시키기 위해, 유속이 같아질 때까지 모터에 가는 PWM 출력을 바꾸어 유속을 제어한다.

B : FRW 설명 (Free Rotating Wheel)

B-1 : FRW 개략도

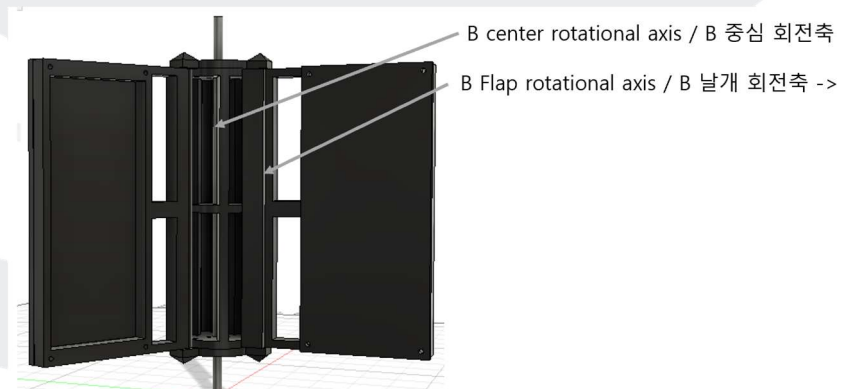


Figure 7 : FRW 개략도, 축 정의

B-2 : FRW 정의



Figure 8 : FRW Axial Dimension, 축 방향 길이 정보.

gearAT : 기어의 축 방향 두께

FlapcapAT : Flapcap의 축 방향 두께

FlapAT : Flap (날개)의 축 방향 두께

S1 flapcap 과 flap 사이의 여분 공간

CenterPieceAT : CenterPiece의 축 방향 두께

S2 : gear와 barmount 사이의 두께

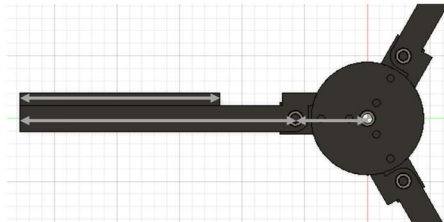
S3: space between FlapcapR & barmount

Black: Rotating Parts, drilled on to B-CRA

Blue: not rotating Parts, connected to B-CRA via Bearing

S: spaces (needs to be bigger than 1mm)

FRW Radial Dimension



FF-RT = 90

B-CRA to B-FRA = 60

(Flap Frame Radial Thickness)

F-RT = 80

(Flap Radial Thickness)

Figure 9 : FRW Radial Dimension

B-3 : FRW 부품 별 설명

가. FF (Flap Frame)



Figure 15: 15-A: 45-90 FF. 45도에서 90도 회전 가능한 FF 15-B: 0-90 FF, 15-C: 0-45 FF.



Figure 16 : 15-D: 0-45 FF에서 0도. 15-E : 0-45 FF에서 45도. 15-F : 0-90 FF에서 90도.

나. FC (Flap Cap)



Figure 17 : FRW FC (날개 수 3, 4, 5) (Left & Right) 이다.

Flap Cap은 B-FRA를 CB에 고정하는 역할을 한다. Left FC는 기어를 수차에 연결한다.

다. CB (Center Body)

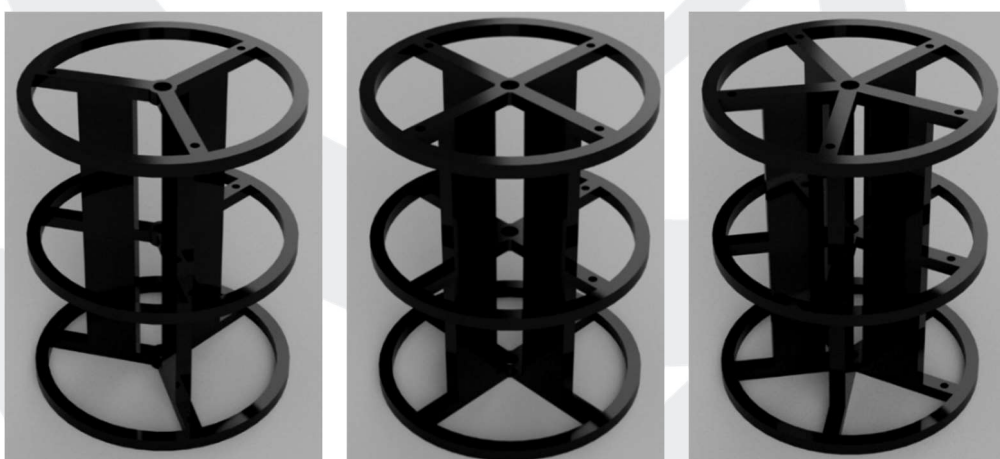


Figure 108 : FRW Center Body 3, 4, 5이다.

날개 수에 따라서 3, 4, 5로 나뉘며, 원형 돌리는 Flap Frame의 각도 제어를 위해 설치하였다.

C : ADW 설명

C-1 : ADW 개략도

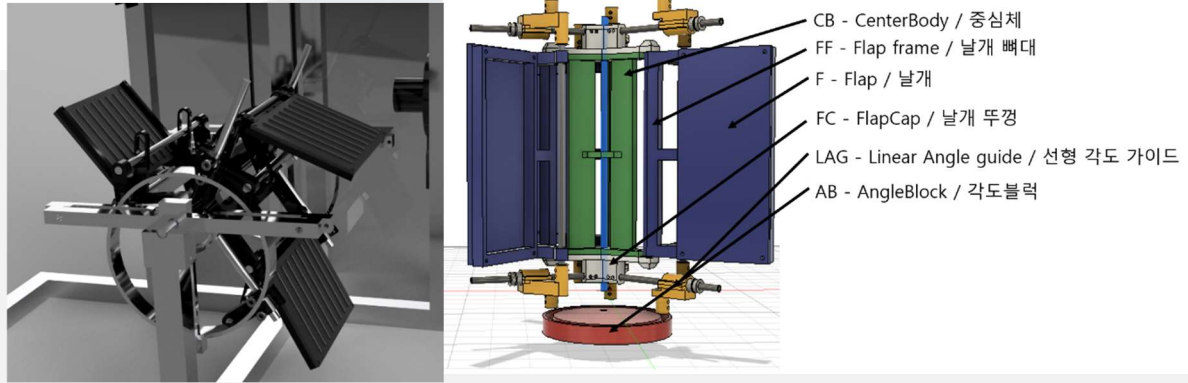


Figure 19 : ADW 개략도. ADW 3 Flap StraightFlapWF, ADW 부품 정의

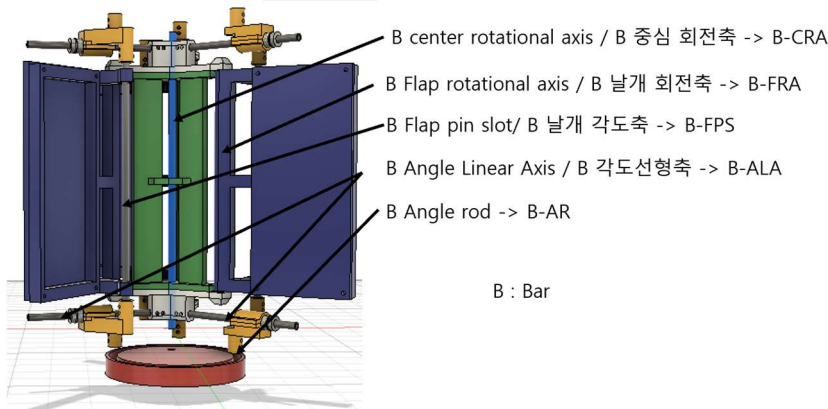


Figure 20 : ADW 축 정의

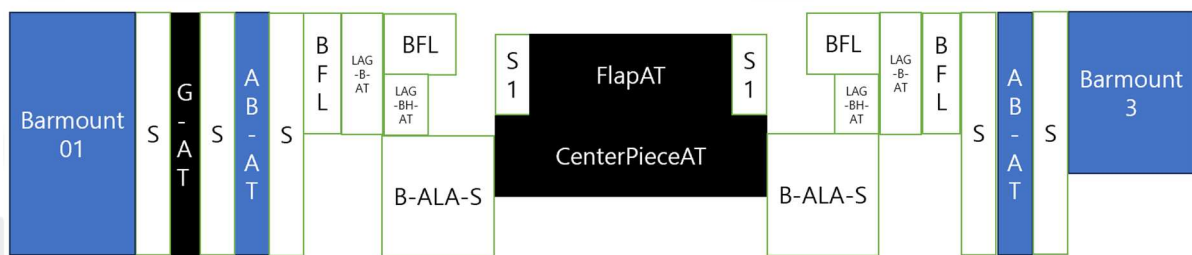


Figure 21 : ADW Axial Dimension

AB-AT : 각도블럭 axial 두께

BFL: Bar Fix Length

FC-AT : flap cap 축 방향 두께

LBT: Linear Bush Thickness

G-AT : 기어 축방향두께

LAG-LB-B-T: LAG linear bearing body thickness

LAG-AT: Linear Angle Guide Axial Thickness

LAG-B-AT: LAG Body Axial thickness

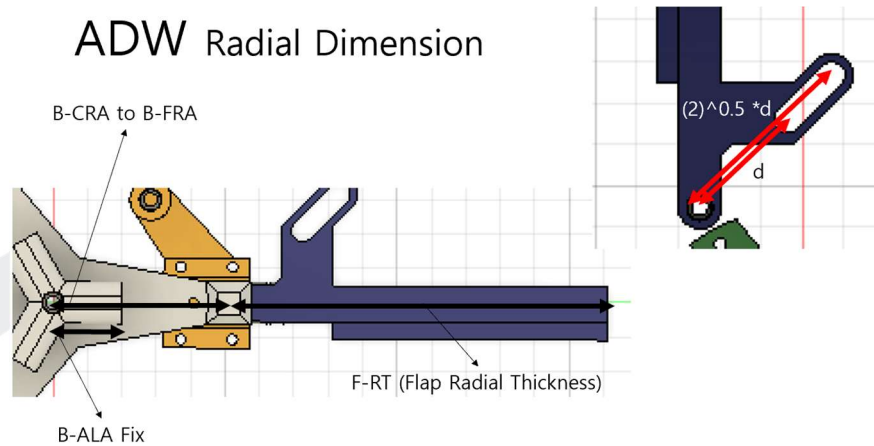


Figure 22 : ADW Radial Dimension. ADW FF에서 Pin-Slot 거리를 기재하였다. (-45~45 변역 기준)

C-3 : 부품 별 설계

가. ADW FF, ADW Angle Block



Figure 23 ADW FF. FF에 부착되어 각도를 0~90도까지 제어하게 된다. / ADW Angle Block

나. FC

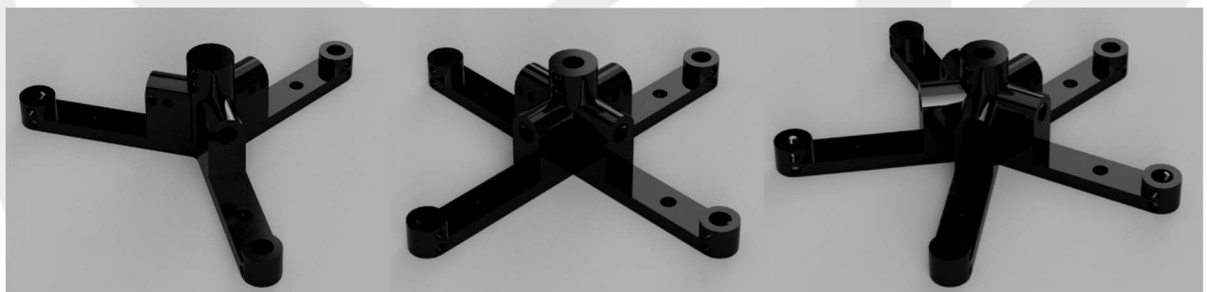


Figure 24 ADW FC, 3, 4, 5. B-ALA (Bar- Angle Linear Axis)를 꽂기 위한 고정 축이 있다.



다. CB



Figure 25 ADW CB 3, 4, 5. FRW와 다르게 원형 받침대 없이 경량이다.

라. LAG

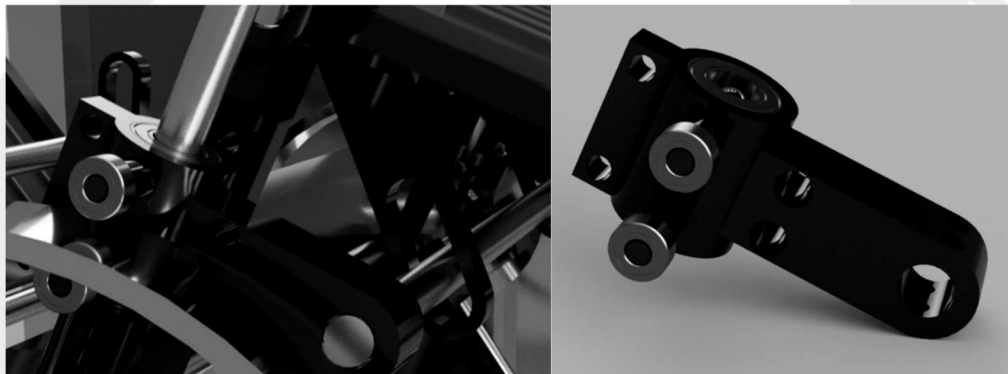


Figure 26 LAG (Linear Angle Guide). 26-A : LAG가 조립된 모습. Angle Block에 연결되어 이동하면서 동시에 B-FPS에 연결되어 Flap의 각도를 정한다. 26-B : LAG의 모습.

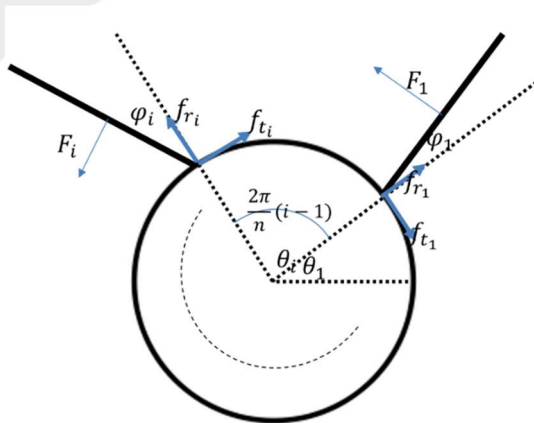
D : Flap 설명



Figure 27 27-A: Straight Flap, 27-B: StraightFlapWF, 27-C: Half Capsule Flap, 27-D: Full Capsule Flap

B. FRW의 이론적 분석

날개의 각도를 직접적으로 조정하지 않고 날개 각의 회전 각의 범위를 제한하여 자유롭게 날개가 회전할 수 있도록 설계한 FRW에 작용하는 힘, 토크, 시간에 따른 각도 등을 분석해보았다.



유체 속에서 운동하는 모델을 단순화하여 분석하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 모든 물 입자의 속도 벡터 방향은 동일하다
2. 물은 충돌 시 탄성충돌을 한다
3. 물의 유속은 모든 지점에서 동일하다.
4. 모든 날개의 운동은 독립적이다.

Figure 28 FRW 모식도

물의 방향과 i 번째 막대 끝의 각도를 θ_i 라 하자 ($\theta_1 = \theta$)

반지름 방향과 i 번째 막대의 방향 사이 각도를 ϕ_i 라 하자 ($\phi_i' = \theta_i + \phi$)

다음 성질을 만족한다. $\theta_i = \theta_1 + \frac{2\pi}{n}(i-1)$ $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3 = \dots = \dot{\theta}_n$ $\ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_2 = \ddot{\theta}_3 = \dots = \ddot{\theta}_n$

1) 흐르는 물속에서 날개가 받는 힘

날개의 길이 l , 날개의 폭을 w 일 때, 날개와 물의 각도 $\theta + \phi$ 는 이다.

물 입자가 날개와 충돌하여 생기는 운동량의 변화를 통해 힘을 구할 수 있다.

$$\text{충격량} = v \sin(\theta + \phi) (\Delta t) l w \rho \times 2v \sin(\theta + \phi) = F(\Delta t)$$

$$F = 2\rho l w v^2 \sin^2(\theta + \phi)$$

2) f , ϕ , θ 의 관계 구하기

원판의 중심을 (0,0)으로 설정하고 벡터로 구분하여 관계를 구할 수 있다.

\vec{f} : 막대가 받는 힘 (원판 $-\vec{f}$)

\vec{f}_t : \vec{f} 의 접선 방향 성분, \hat{t} : t방향 단위 벡터

\vec{f}_r : \vec{f} 의 반지름 방향 성분, \hat{r} : r방향 단위 벡터



Hanwha SCIENCE CHALLENGE

원판 회전운동 방정식 : $\sum_{i=1}^n f_{ti} R = \frac{1}{2} MR^2 \ddot{\theta}$

i번째 막대 회전운동 방정식 : $\frac{1}{12} m l^2 \ddot{\phi}_i' = (f_{ti} \cos \phi_i + f_{ri} \sin \phi_i) \frac{l}{2} \rightarrow \frac{1}{6} m l \ddot{\phi}_i' = f_{ti} \cos \phi_i + f_{ri} \sin \phi_i$

i번째 막대 무게중심의 위치 벡터 $\vec{r}_i = R(\cos \theta_i, \sin \theta_i) + \frac{l}{2}(\cos \phi_i', \sin \phi_i')$

i번째 막대 중심의 가속도

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{r}}_i &= R\ddot{\theta}(-\sin(\theta_1 + \frac{2\pi}{n}(i-1)), \cos(\theta_1 + \frac{2\pi}{n}(i-1))) - R\dot{\theta}^2(\cos(\theta_1 + \frac{2\pi}{n}(i-1)), \sin(\theta_1 + \frac{2\pi}{n}(i-1))) \\ &\quad + \frac{l}{2}\ddot{\phi}_i'(-\sin \phi_i', \cos \phi_i') - R\dot{\phi}_i'^2(\cos \phi_i', \sin \phi_i') \end{aligned}$$

$$\hat{r} = (\sin \theta, \cos \theta)$$

$\hat{t} = (\cos \theta, -\sin \theta)$ 이므로, i번째 막대에 대한 단위벡터는 회전변환의 형태로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \hat{t}_i \\ \hat{r}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) & -\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) \\ \sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) & \cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{t} \\ \hat{r} \end{pmatrix}$$

i번째 막대 중심의 가속도 단위 벡터로 표현하기

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{r}} &= R\ddot{\theta}(\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1))\hat{t} - \sin(\frac{2\pi}{n}(i-1))\hat{r}) - R\dot{\theta}^2(\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1))\hat{t} + \cos(\frac{2\pi}{n}(i-1))\hat{r}) + \frac{l}{2}\ddot{\phi}_i'(-\sin \phi_i', \cos \phi_i') - \frac{l}{2}\dot{\phi}_i'^2(\cos \phi_i', \sin \phi_i') \\ &= \frac{1}{m}(f_{ri}(\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1))\hat{t} + \cos(\frac{2\pi}{n}(i-1))\hat{r}) - f_{ti}(\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1))\hat{t} - \sin(\frac{2\pi}{n}(i-1))\hat{r})) + \frac{F}{m}(-\sin \phi_i', \cos \phi_i') \end{aligned}$$

각각의 단위 벡터에 대해 성분을 비교해보자

1. \hat{r} 방향

$$-R\ddot{\theta}\sin(\frac{2\pi}{n}) - R\dot{\theta}^2\cos(\frac{2\pi}{n}) + \frac{l}{2}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i')\cos \phi_i - \frac{l}{2}(\dot{\theta} + \dot{\phi}_i')^2\sin \phi_i = \frac{1}{m}f_{ri}\cos(\frac{2\pi}{n}) + f_{ti}\sin(\frac{2\pi}{n}) + \frac{F}{m}\cos \phi_i$$

2. \hat{t} 방향

$$R\ddot{\theta}\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - R\dot{\theta}^2\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - \frac{l}{2}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i')\sin \phi_i - \frac{l}{2}(\dot{\theta} + \dot{\phi}_i')^2\cos \phi_i = \frac{1}{m}f_{ri}\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - f_{ti}\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - \frac{F}{m}\sin \phi_i$$

위 두 식을 연립하여 f_r 과 f_t 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & (R\ddot{\theta}\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - R\dot{\theta}^2\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - \frac{l}{2}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i')\sin \phi_i - \frac{l}{2}(\dot{\theta} + \dot{\phi}_i')^2\cos \phi_i + \frac{F}{m}\sin \phi_i)\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) \\ & + (-R\ddot{\theta}\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - R\dot{\theta}^2\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) + \frac{l}{2}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i')\cos \phi_i - \frac{l}{2}(\dot{\theta} + \dot{\phi}_i')^2\sin \phi_i + \frac{F}{m}\cos \phi_i)\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) \\ & = \frac{1}{m}f_{ri} \\ & (-R\ddot{\theta}\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - R\dot{\theta}^2\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) + \frac{l}{2}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i')\cos \phi_i - \frac{l}{2}(\dot{\theta} + \dot{\phi}_i')^2\sin \phi_i + \frac{F}{m}\cos \phi_i)\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) \\ & - (R\ddot{\theta}\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - R\dot{\theta}^2\sin(\frac{2\pi}{n}(i-1)) - \frac{l}{2}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i')\sin \phi_i - \frac{l}{2}(\dot{\theta} + \dot{\phi}_i')^2\cos \phi_i + \frac{F}{m}\sin \phi_i)\cos(\frac{2\pi}{n}(i-1)) \\ & = f_{ti} \end{aligned}$$

\dot{f}_r 과 \dot{f}_t 을 원판과 막대의 회전 운동방정식에 대입하면 터빈의 운동을 예측할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n [-R\ddot{\theta} - R\dot{\theta}^2 \sin(\frac{4\pi}{n}(i-1)) + \frac{l}{2}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i) \sin(\frac{2\pi}{n}(i-1) - \phi_i) - \frac{l}{2}(\dot{\theta} + \dot{\phi}_i)^2 \cos(\frac{2\pi}{n}(i-1) - \phi_i) + \frac{F}{m} \sin(\frac{2\pi}{n}(i-1) + \phi_i)] = \frac{1}{2}MR\ddot{\theta}$$

$$\frac{1}{6}ml(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i) = [-R\ddot{\theta} - R\dot{\theta}^2 \sin(\frac{4\pi}{n}(i-1)) + \frac{l}{2}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i) \sin(\frac{2\pi}{n}(i-1) - \phi_i) - \frac{l}{2}(\dot{\theta} + \dot{\phi}_i)^2 \cos(\frac{2\pi}{n}(i-1) - \phi_i) + \frac{F}{m} \sin(\frac{2\pi}{n}(i-1) + \phi_i)] \cos \phi_i$$

$$+ [-R\dot{\theta}^2 - \frac{l}{2}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_i) \cos(\frac{2\pi}{n}(i-1) + \phi_i) - \frac{l}{2}(\dot{\theta} + \dot{\phi}_i)^2 \sin(\frac{2\pi}{n}(i-1) + \phi_i) + \frac{F}{m} \cos(\frac{2\pi}{n}(i-1) - \phi_i)] \frac{\sin \phi_i}{m}$$

4. 연구결과

A. CFD 결과

CFD는 Autodesk CFD 2024를 이용하여 수행했으며, 300 * 300 * 300 mm의 큐브에 Flap을 넣어 유속과 이루게 되는 각을 바꾸어 가며 힘을 측정하였다.

각도는 10도 단위로 바꾸어 가며 0~350에 대해서 실험을 수행했으며 벽 계산기를 이용하여 날개에 가해지는 힘을 구하였다.

큐브의 한쪽 면에는 1m/s의 조건을 주고, 반대편에는 0Pa의 압력 경계조건을 주었다.

다음은 CFD로 도출해낸 각 날개 4 종류 (FullCapsuleFlap, HalfCapsuleFlap, StraightFlap, StraightFlapWF)에 대한 유속단위벡터에 대한 각도에 대한 힘 그래프이다. F_y 는 유속에 같은 방향의 힘이며, F_z 는 중력에 반대되는 방향의 힘이다. (단위 : N)

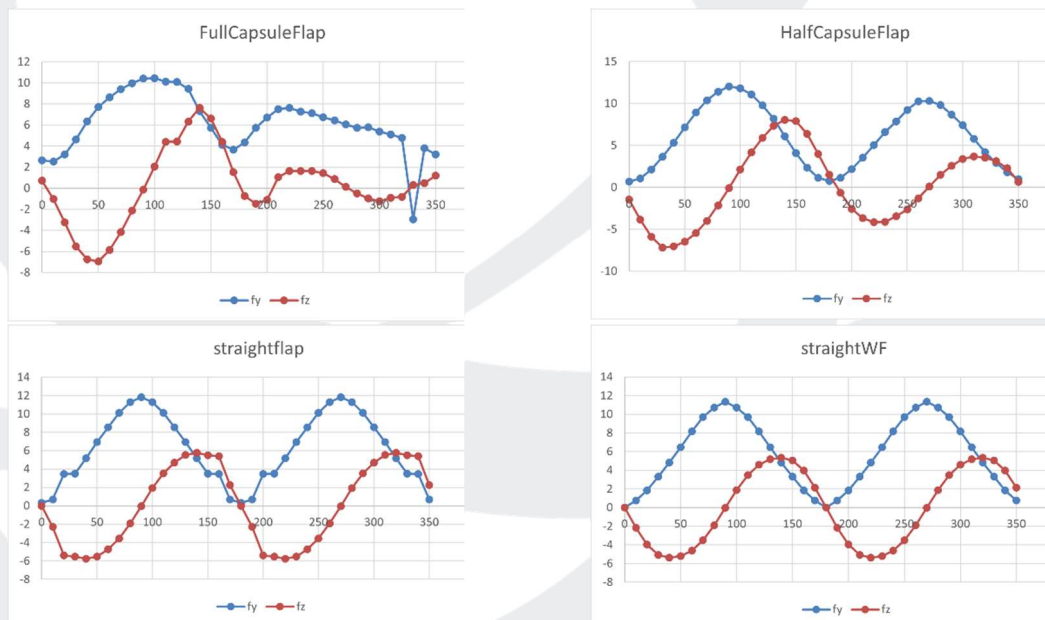


Figure 29 : CFD를 통해 구한 유속단위벡터에 대한 각도에 대한 힘 그래프이다.

형상으로 인해 FullCapsuleFlap과 HalfCapsuleFlap의 경우 180도를 기점으로 비대칭적인 힘이 발생하지만, StraightFlap과 StraightFlapWF의 경우에는 대칭적인 흐름이 만들

어진다. 이러한 대칭성은 수차의 효율을 감소시키는 요인이므로, FullCapsuleFlap/HalfCapsuleFlap과 같이 비대칭적인 힘 그래프에서 더 좋은 성능이 나올 것을 기대할 수 있다.

Wing Fence란 비행기와 같은 항공기에서, 날개의 추력을 증가시키기 위해 날개에 적용하는 속도방향의 튀어나온 구조물이다. 이러한 WingFence구조를 적용한 것이 StraightFlapWF이다. 하지만 CFD 결과로 비교해 볼 때, F_y 의 표준편차는 거의 유사하며 F_z 의 표준편차가 StraightFlap이 더 큰 것으로 유추해 보아 (StraightFlap F_z STDEV 4.3N, StraightFlapWF 3.92N) 이므로 오히려 WingFence 구조를 적용한 구조물에서 효율이 감소함을 알 수 있다. 이는 공기에 비해 물의 높은 점성으로 인한 손실에서 기인한다고 판단된다.

B. ADW의 성능 최적화, 예측

B-1 ADW 최적화 과정

ADW에서, 날개의 각도는 모든 θ 에 대해 ϕ 의 값을 정해줌으로서 최적화가 가능하다. 이때 날개의 ϕ 의 값을 정하는 것은 Angle Block의 radial length에 의해 결정되는 것이다.

날개와 유속벡터가 이루는 각을 δ 로 두면, θ 와 ϕ , δ 의 관계를 유도할 수 있다. ADW 성능 최적화를 위해 optimizer 코드를 구성하였다. Optimizer 코드는 CFD 분석을 통해 얻은 힘 데이터를 이용하여 날개 형상에 최적화된 Angle Block의 형상을 정해주는 코드이다.

모든 θ 에 대해서, ϕ 의 각도 범위 0~90에 대해 δ 의 범위가 정해지며, 해당 범위 내에서 최대의 토크를 나타내는 ϕ 의 값을 지정한다. 토크는 모멘트암 * 힘이라는 간단한 공식을 이용하여 구하였으며 이는 Figure 23에 나오는 코드를 통해 구한다.

```
fy = dataset[1][index][0]
fz = dataset[2][index][0]

r1 = 60 #mm
l = 90 #mm

x = r1 * math.cos(math.radians(theta)) - l/2 * math.cos(math.radians(delta))
y = r1 * math.sin(math.radians(theta)) + l/2 * math.sin(math.radians(delta))

torque = x*fz + y * fy
```

Figure 30: torque code

최대 토크를 위 코드로 맵핑 한 이후, 이 θ 와 ϕ 의 관계를 나타내는 리스트를

thetaphi_raw로 저장한다. 해당 리스트를 바로 AngleBlock의 형상으로 바꿀 수 있으면 좋겠지만 과도한 기울기로 인한 저항을 고려하기 위해 Smoothing 절차를 추가하였다.

Smoothing 절차는 값을 더 원만하게 만들기 위해서 사용하는 절차로, 다음과 같이 작동한다. 모든 요소를 자기 앞과 뒤를 포함한 3 요소의 평균값으로 업데이트한다. 이를 재귀적으로 k번 반복하는 것이 아래 Figure 23-B의 smoothout 함수이며, 구현 가능한 형태의 AngleBlock을 만드는데 필수적이다.

```
def phitor(phidist):
    r = []
    d = 30 #mm
    r1 = 60
    for phi in phidist :
        r.append(r1 + d * math.tan(math.radians(phi -45)))
    return r
```

```
42. def smooth(l, i):
43     su= indexer(l, i-1) + indexer(l,i) + indexer (l, i+
44     return su/3
45
46. def smoothout (l, k):
47     nex = []
48     for index in range(len(l)):
49         nex.append(smooth(l, index))
50
51     if (k == 0) :
52         return nex
53     return smoothout(nex, k-1)
```

Figure 31 : A : phitor, B : smoothing 코드

AngleBlock은 Phi값이 아닌 radial 값으로 맵핑되기 때문에 phi to r 코드를 이용해서 radial값으로 바뀌어야 한다. 이러한 함수를 통해 phitor로 변환된 이후, radial 정보를 이용하여 점을 찍어 Dxf (출력 가능한 스케치 파일 형태) 로 변환 이후 AngleBlock으로 만들 수 있다.

Smoothing을 통해 Phi Distribution (Theta 와 Phi 사이 관계 리스트)가 바뀌면, 이를 통해 얻어지는 최대 성능 또한 바뀐다. 이러한 성능 저하를 측정하기 위해 Phi Distribution에서 얻어지는 전체 Torque를 계산하는 코드를 구현하였다.

다음은 그 코드로 구해진, smoothing으로 인한 성능 저하이다.

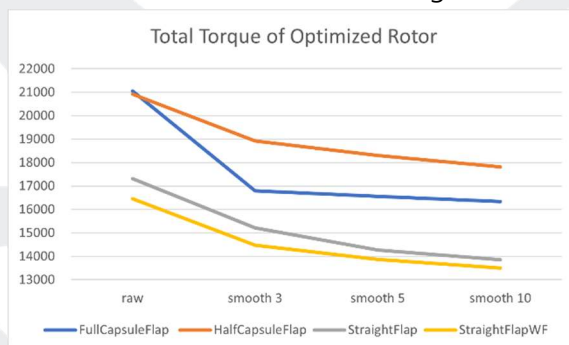


Figure 32: Total Torque of Optimized Rotor

Smoothing을 재귀적으로 3, 5, 10번 적용 한 것의 손실을 나타낸 것이다. 이때 최대 토크는 HalfCapsuleFlap-FullCapsuleFlap-StraightFlap-StraightFlapWF 순서로 좋다는 것을 알 수 있다.

이때 단순한 Repeated Mean 방식이 아닌 다른 방식으로 Smoothing을 구현하면 더 높은 효율과 낮은 저항을 얻을 수 있을 것이라고 생각한다.

C. 일반적인 물레방아와 효율 비교

일반적인 물레방아를 개선한 우리의 수차의 토크 예상치가 일반적인 물레방아에 비하여 더 높은 토크를 얻을 수 있는지 구해보았다. 날개 사이에 유체의 간섭은 없다고 가정하였으며, 날개가 단일하게 존재할 때 받는 힘이랑 물레방아 안에서 받는 힘이 같다고 가정하였으며, 물레방아의 날개는 모두 $\phi = 90^\circ$ 이며 물에 담긴 영역은 $\theta = 180 \sim 360^\circ$ 로 두고 토크를 계산하였다.

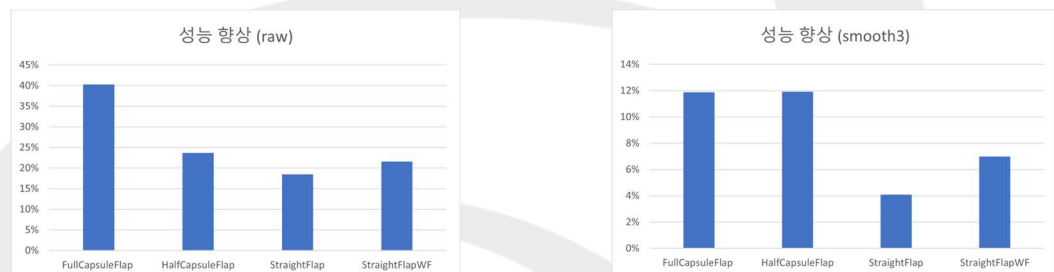


Figure 33 : Raw Flap & SmoothFlap 물레방아 비교 성능 향상

Raw하게 맵핑한 경우, FullCapsuleFlap에서 40%의 성능 향상, HalfCapsuleFlap에서 24%의 성능향상이 있을 것으로 기대되었으며, StraightFlap과 StraightFlapWF은 18%, 22%의 성능향상이 있을 것으로 기대되었다. Smooth3의 경우 성능이 많이 저하되어 FullCapsule와 HalfCapsule에서 약 12%의 성능향상이 있을 것으로 기대되었다.

5. 결론

A. 고찰

FRW의 경우 어항의 설계 오류로 인해 실험을 제대로 진행하지 못했다. 하지만 FRW는 회전하는 데에 수력을 소모하기 때문에 일반적인 물레방아에 비교하여 높은 효율을 얻기는 힘들 것으로 예상된다. FRW의 회전이 이루어지는 과정은 관찰하였지만 이것이 유의미한 실험 결과로 이어지지는 못했다.

물리 이론적인 분석을 통해서 미분방정식을 유도해내었지만 이 또한 컴퓨터로 풀리는 형태가 아니어서 무척이나 물리적으로 복잡한 계를 다룬다는 것을 알았으며 이러한 접근 방식으로 FRW를 개발하기는 무척 어렵다는 것을 깨달았다.



Hanwha SCIENCE CHALLENGE

ADW의 경우, CFD를 통해 얻은 데이터를 바탕으로 유의미한 최적화가 가능했다. ADW를 이용하여 물레방아에 비교하여 효율을 40% 가까이 증가시킬 수 있음을 확인하였으며, 강의 수심을 2배 가까이 활용할 수 있다는 것을 알아냈다. 프로펠러에 비해 대형화하기 쉬운 구조로, 특정 부품 (Angle Block, LAG)의 내구도 문제가 해결되면 유용한 해결책일 것으로 예상된다. 하지만 회전체의 지나치게 복잡한 구조로 인해 빠른 유속에서는 적용 불가능 할 것으로 예상되며 느린 유속에서 최대 효율을 이끌어내는데 좋은 해결책일 것으로 예상된다.

B. 결론

강과 같은 광폭 저속 수로에서 발전가능한 접이식 수차를 개발하기 위해 FRW와 ADW의 두 가지 아이디어를 내었다. 이러한 아이디어를 검증해 보았을 때, FRW의 경우 기존 물레방아에 비해 낮은 효율을 가진다는 것을, ADW의 경우 최대 40%의 높은 효율을 성취해 낼 수 있음을 알아내었다. 하지만 이 과정 또한 수많은 가정이 들어가 있는 결론으로, 어항을 개선하여 실제 환경에서 실험을 진행하여야 유의미한 결론을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

C. 제언

1. FF 부품의 내구도 문제

수많은 Flap 구조를 효율적으로 실험하기 위해, 수차의 날개를 부품 수 총 3개로 조립식으로 구성하고자 하였다. 이 과정 속에서 3D 프린터와 아크릴을 혼용해서 사용하였으며, 날개와 같이 견고해야 하는 부품이 과도하게 복잡한 형상으로 설계되어 내구도에 문제가 생겼다. FF 부품은 자꾸 부러졌으며 3D 프린터로 뽑은 부품은 설계 공차를 고려하지 않고 오차로 인해 폭이 5mm보다 좁은 문제가 생겼다.

실제 발전소에 적용시에는 이러한 문제가 없도록 날개를 일체형으로 설계해야 할 것이다.

FF 부품은 일체형 레진으로 수정하여 2차 보완 실험을 진행할 것이다. 내구도에 대한 우려가 훨씬 적어질 것으로 기대된다.

2. 어항의 설계 문제

어항 내부에서 물을 순환시키기에 역부족인 설계를 하였으며 이에 대한 검증이 부족하였다. 모터로 추진된 물은 벽면에 맞아 원하는 대로 회전하지 않았으며, 벽에 맞은 이후 상승하여 역행하는 현상을 일으켜 상류와 하류에 반대되는 물의 흐름이 일어났다. 이러한 문제로 인해 수차의 회전 실험이 제대로 진행되지 못했다. 하지만 물이 예상대로 흐르는 경우, CFD 결과를 이용해 유의미한 예측을 할 수 있다. 차후에 어항의 물 순환을 바꾸어 다시 진행해볼 계획이다. 어항 모터를 하나 더 추가해서 흐름을 제어하며, 아크릴로 물의 경로를 제어하여 다시 시도할 것이다.