

BSPE9
9965-1
3028-2

BSPE99965-13028-2

생체모방형
해양로봇의
플래핑
추진
요소기술
개발

생체모방형 해양로봇의
플래핑 추진 요소기술 개발

Development of Flapping Propulsion Core Technology for
Biomimetic Marine Robots

2022.02.28

한국해양과학기술원

한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “생체모방형 해양로봇의 플래핑 추진 요소기술 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2022. 02. 28.

총괄연구책임자 : 김 지 훈

참 여 연 구 원 : 장 인 성

“ : 이 화 준

“ : 문 성 민

보고서 초록

과제고유 번호	PE99965	해당단계 연구기간	2021. 6. 14 - 2021. 12. 31	단계 구분	1단계(최종)
연구사업명	중사업명	미래선도사업			
	세부사업명	신진연구자 지원과제			
연구과제명	대과제명	생체모방형 해양로봇의 플래핑 추진 요소기술 개발			
	세부과제명				
연구책임자	김지훈	해당단계 참여연구원수	총 : 4명 내부: 4명 외부: 0명	해당단계 연구비	50,000천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 4명 내부: 4명 외부: 0명	총 연구비	50,000천원
연구기관명 및 소속부서명	해양로봇실증센터		참여기업명	-	
국제공동연구	-				
위탁연구	-				
요약				보고서 면수	-
<p>○ 생체모방형 해양로봇의 플래핑 추진 요소기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 생체모방 듀얼 플래퍼 장치 제작 및 구축 - 다중 플랩간 인자(거리, 부하 등)에 따른 추진성능 검증 - 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry, PIV)를 이용한 유동가시화 및 계측 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	생체모방, 추진, 해양로봇, 플래핑, 유동가시화, 제어			
	영 어	Biomimectis, Propulsion, Marine Robots, Flapping, Flow Visualization, Control			

요 약 문

본 연구에서는 1)해양생물들이 플레핑 추진방식을 통해 이동에 필요한 에너지 사용 효율성을 극대화 하는 기술과 2)생체모방기술을 해양로봇에 접목시킬 수 있도록 개발하는 것이 목표이다. 이를 위해 생체모방 플랩퍼 추진 장치 제작을 하였으며, 인자에 따른 추진 성능을 검증하였다. 향후 본 생체모방 결과를 이용하여 해양로봇의 확장성을 기대할 수 있는 요소부품에 활용할 예정이다.

SUMMARY & KEYWORDS

This study aims to develop 1) a technology that maximizes the energy use efficiency required for movement through flapping propulsion methods and 2) a biomimetic technology to be applied to underwater robots. A biomimetic flapper propulsion device was manufactured, and the propulsion performance according to the varying parameters is verified. From those results, this biomimicry mechanism will be used for element parts that can be expected to expand underwater robots.

생체모방(Biomimetics), 추진(Propulsion), 해양로봇플래핑(Flapping),
해양로봇(Marine Robots), 유동가시화(Flow Visualization)제어(Control)

C O N T E N T S

Chapter 1. Objective and Contents	7
1.1. Objective and previous researches	7
A. Research overview	7
Chapter 2. Literature Review	9
2.1. Previous researches related to the biomimetic technology	9
Chapter 3. R&D Implementation Details and Results	10
3.1. Manufacture of biomimetics flapper propulsion equipment	10
A. Manufacture of flapper mechanism system for biomimetics technology (hydrofoil type) ..	10
B. Working system and validation	11
C. Sensor and controllers	12
D. Measurement and control S/W production	13
E. Parametric study of propulsion performance	18
F. Comparison study of computational fluid dynamics and experimental fluid dynamics ..	23
Chapter 4. Achievement of R&D Goals and Contribution	36
Chapter 5. Future Plan through R&D Results	36
Chapter 6. References	37

목 차

제 1 장. 연구개발의 목표 및 내용	7
1.1. 연구개발의 목표 및 최근 연구동향	7
가. 연구개발 개요	7
제 2 장. 국·내외 연구현황	9
2.1. 수중 플랩퍼 생체모방 관련 연구	9
제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과	10
3.1. 생체모방 플랩퍼 추진 장치 제작 및 구축	10
가. 생체모방을 위한 2개 이상의 플래퍼 구동시스템 제작(수중익 형태)	10
나. 시스템의 작동 방식	11
다. 센서 및 제어기	12
라. 계측 및 제어 S/W 제작	13
마. 다중 플래퍼 간 인자(거리, 부하 등)에 따른 추진성능 검증	18
바. 전산수치해석 및 실험유체역학기법을 통한 비교해석 수행	23
제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	36
제 5 장. 연구개발결과의 활용계획	36
제 6 장. 참고문헌	37

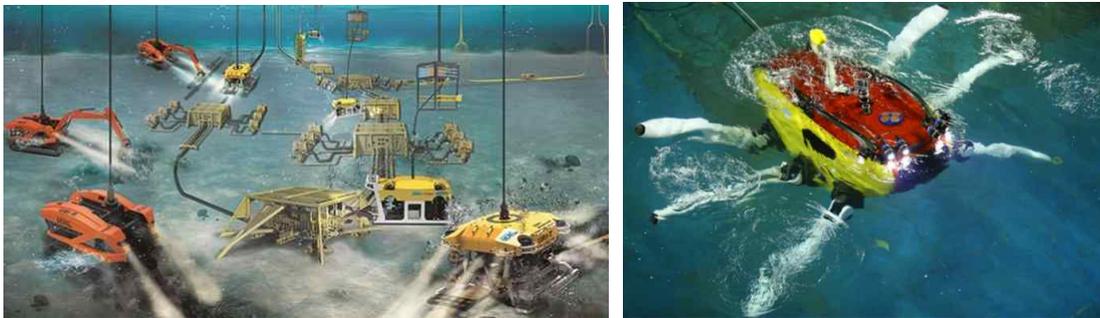
제 1 장. 연구개발의 목표 및 내용

1.1. 연구개발의 목표 및 최근 연구동향

가. 연구개발 개요

(1) 해양로봇(Marine robots)의 활용성 제고 및 강화

- 지구의 70%로 이루어진 해양은 주요 자원확보와 국민안전 및 안보 차원에서 전 국가적으로 기술개발을 진행하고 있으며, 이를 위해 인공위성, 선박, 잠수 등 다양한 분야의 연구가 활발히 이루어지고 있음. 최근에는 해양환경(조류, 수압, 파랑, 시야 등)극복을 위해 다목적 해양로봇을 개발하여 감지, 공사, 구조 및 탐사 등 다양한 분야에 활용하고 있음.



<그림 1. 한국해양과학기술원 및 선박해양플랜트연구소에서 개발한 다양한 수중로봇>

- 해양로봇은 2000년 이후 활발한 기술개발을 통해 수중건설로봇, 무인탐사로봇, 심해탐사로봇(채굴), 감시정찰로봇 등 다양한 형태와 목적으로 세분화되었음
- 한편, 해양로봇을 구동하는 동력원은 주로 유압, 전기식으로 운용되고 있으며, 2015년 이후 배터리셀의 고밀도 집적기술에 힘입어 차기 동력원은 순수한 전기로 구동되는 플랫폼으로 진화되는 추세임. 이는 유인 혹은 무인 모두 해당되는 사항임
- 현재 국제해사기구(IMO)의 MARPOL 73/78 규정에 따라 대형선박에만 에너지효율을 고려한 설계(EEDI)를 필수 적용으로 규제하고 있으나, 향후 환경규제가 강화되며 해양로봇의 분과도 강화규제에 일부 편입 될 가능성이 있음. 이는 곧 친환경/고효율 기술이 해양로봇에도 필수 요소가 될 수 있다는 점을 시사함
- 특히 종래의 해양로봇을 구성하는 핵심 요소기술인 추진기(propulsion unit)는 프로펠러가 유체 내 회전을 하며, 이로 인해 발생하는 추력을 이용하여 이동 및 위치제어에 활용하고 있음. 이러한 프로펠러 방식은 유체 내 노이즈와 교란을 발생시켜 환경관측이나 정탐지 임무(구조, 감시 등)에 적합한 형태로 쓰이기 어려움

- 추진기 기술 효율성과 환경규제, 그리고 기 개발된 해양로봇을 적극 활용하기 위해 이를 구성하는 요소기술의 혁신적 보완이 요구됨.

(2) 생체모사(Biomimetics)의 효율성

- 생체모방은 인류의 역사와 함께 해왔으며, 38억년 동안 지구환경에 맞게 진화한 자연생물체에서 영감을 얻어 비행기, 헬리콥터, 잠수정 등 다양한 기술 확장의 근간이 되었음
- 이 중, 추진력 관점에서 수중에서 고속 기동이 가능한 해양생물인 참치, 고래, 돌고래, 펭귄 등은 플레핑 수중익(이상 ‘플래퍼’로 표기함)형태로 80% 이상의 효율을 얻는 반면에 프로펠러의 경우 투입 에너지 대비 40-50%의 효율을 얻음. 특히 프로펠러의 고속 회전 기동에서 발생하는 후류(wake)와 공동(cavitation)효과는 해양로봇의 플랫폼의 구조강성의 증가 요구와 운영 제약을 수반하게 됨
- 그 외, 수중에서 저속기동을 하는 해양생물(해파리, 가오리, 거북이 등) 세포막과 유연플랩을 이용해 수영과 유영 등의 기술을 접목하여 조류와 파랑은 외란이 있는 환경에서 위치제어를 수행함



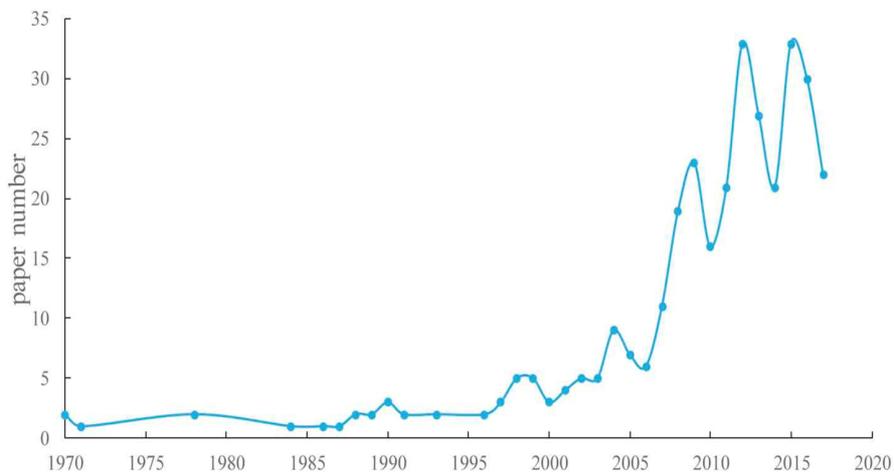
<그림 2. 플레핑을 이용하는 다양한 해양생물>

- 무엇보다도 상기에서 언급한 해양생물들은 플레핑을 이용하여 해양환경의 교란(조류, 파랑, 압력차 등)에서 효율적으로 이동하는 것으로 밝혀짐(Alexander D. Becker et al., Nature, 2015)

제 2 장. 국·내외 연구현황

2.1. 수중 플랩퍼 생체모방 관련 연구

- 자연의 다양한 조류와 해양 생물들이 플래핑 수중익을 통해 효율적 추진력을 얻고 있으며(J. Yu et al., 2005) 이를 모방하여 이용하고자 하는 많은 연구가 진행되었음. Knoller (1909)과 Betz (1912)의 플랩에 의한 양력과 추력 발생에 대한 연구이래로 플래핑을 이용한 새로운 추진이나 수중 에너지 추출 등 다양한 목적의 연구가 진행되었음. 그림 3에서처럼 플래핑 대한 연구는 2000년 후부터 눈에 띄게 증가하였으며, 그 추세는 최근까지 기조가 이어지며 활발한 연구가 진행됨을 알 수 있음 (Wu et al., 2020)



<그림 3. 플래핑과 관련된 주요 논문수(Wu et al., 2020)>

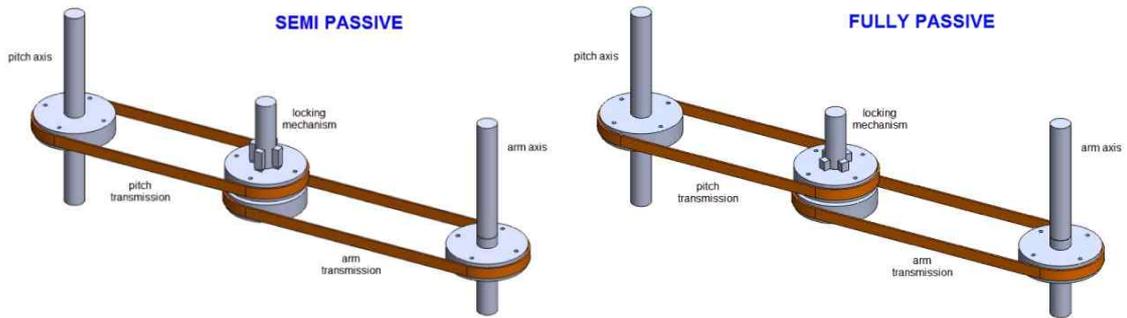
- 실험유체역학(EFD, Experimental Fluid Dynamics) 기반 연구의 경우 수조에서의 실험을 통해 플래핑 수중익의 유동특성과 추진, 에너지 추출에 대한 분석이 이루어졌음. Lua et al. (2011)은 회류수조를 이용하여 플래핑 수중익의 pitch와 heaving을 제어하며 실험을 진행하였으며 특히 heaving에 의한 진동이 최소화되도록 시스템을 구축하여 외부 교란이 최소화된 유동특성 관찰이 가능하였음. Kumar and Shin (2019)는 다양한 길이와 너비를 갖는 flexible 판에 NACA0015 형상의 수중익을 부착하였고 후류의 패턴과 수력학적 성능에 대하여 분석하였음. Bowker와 James (2018)는 플래핑 수중익을 이용하여 파랑 에너지를 배의 추진력으로 전환하였으며 이를 통하여 5 Hz의 파랑 주기에서 0.48 m/s의 선박 속도를 달성하였음. Xu et al.

- (2017)은 tandem 배치의 수중익을 이용하여 에너지 추출에 대한 연구를 진행하였으며 수중익의 회전축에서의 토크와 환산진동수에 따른 성능 최적화를 제시하였음
- 한편, 전산유체해석(CFD, Computational Fluid Dynamics) 접근을 통한 플랩 수중익에 대한 수치해석 연구또한 널리 진행되었음. Yu et al. (2017)는 유한체적해석법을 이용하여 친이 및 난류영역에서 ($Re \cong 1 \times 10^3 \sim 1.6 \times 10^6$)에서 플랩핑 수중익 추진에 영향을 미치는 역학적 파라미터의 분석을 통하여 최적의 추진 효율을 위한 파라미터 조합을 도출하였음. Medjroubi et al. (2011)는 유한요소해석법을 이용하여 heaving하는 수중익 주위의 유동과 후류를 분석하였음. Zhu et al. (2015)은 Spalart-Allmaras (S-A) turbulence model을 이용하여 적응형의 가변 플랩핑 수중익의 에너지 추출 효율에 대한 수치해석을 진행하였으며, 기존 고정익 플랩핑 수중익에 비해 16.1 % 높은 효율을 보였음. Kinsey와 Dumas (2012)는 S-A model을 이용하여 tandem 형식으로 배치된 두 개의 플랩 수중익에서의 에너지 추출에 대해 분석하였음. Taira and Colonius (2009)는 direct numerical simulations (DNS)를 활용하여 다양한 형상의 수중익에서의 후류 형태를 비교하였음
 - 상기 연구들은 공기 중(일부 수중을 포함하는)플랩핑에서의 유동 특성을 분석하고 추진과 에너지 추출의 최적화에 기여하였음. 그러나 대다수의 경우 단일 플래핑에 초점을 맞추고 있어 유영과 추진에 필요한 다수의 플랩핑 수중익의 상호작용에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않았음
 - 이에 본 연구에서는 1)해양생물들이 플래핑 추진방식을 통해 이동에 필요한 에너지 사용 효율성을 극대화 하는 기술과 2)생체모방기술을 해양로봇에 접목시킬 수 있도록 개발하는 것이 주요 착안점으로써, 유체동역학적 해석(CFD)과 검증(EFD)을 이용한 ‘플래핑 추진 요소기술 개발’을 제안하고자 함

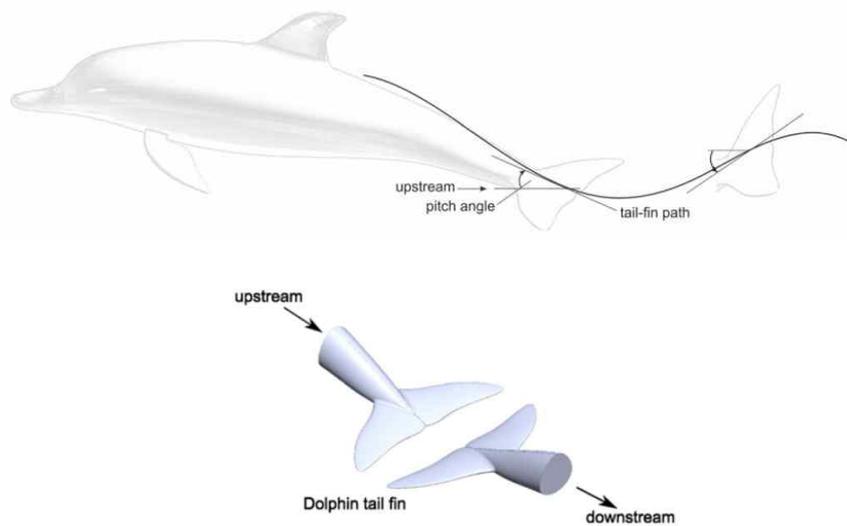
제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

3.1. 생체모방 플래퍼 추진 장치 제작 및 구축

가. 생체모방을 위한 2개 이상의 플래퍼 구동시스템 제작(수중익 형태)

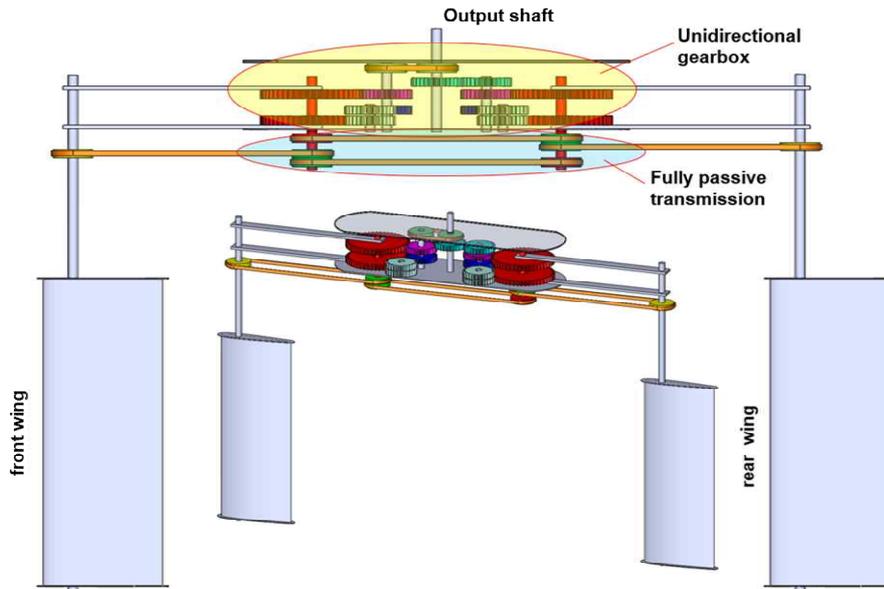


<그림 4. 플래퍼 장치 동력전달계 구성(안)>



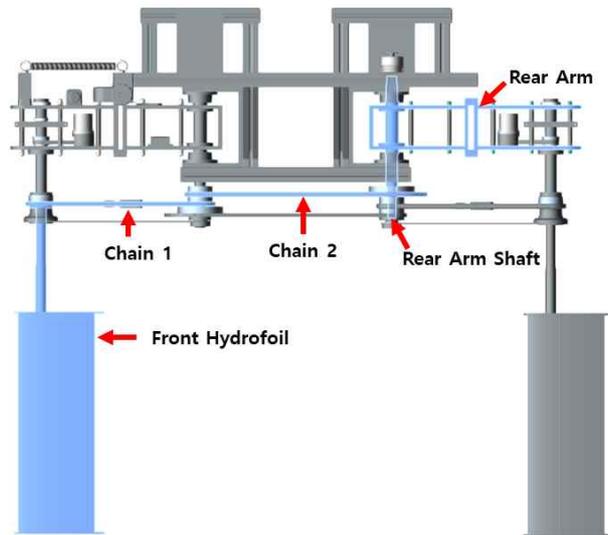
<그림 5. 다중 플랩(핀) 형태의 생체모방 형상(안)>

나. 시스템의 작동 방식

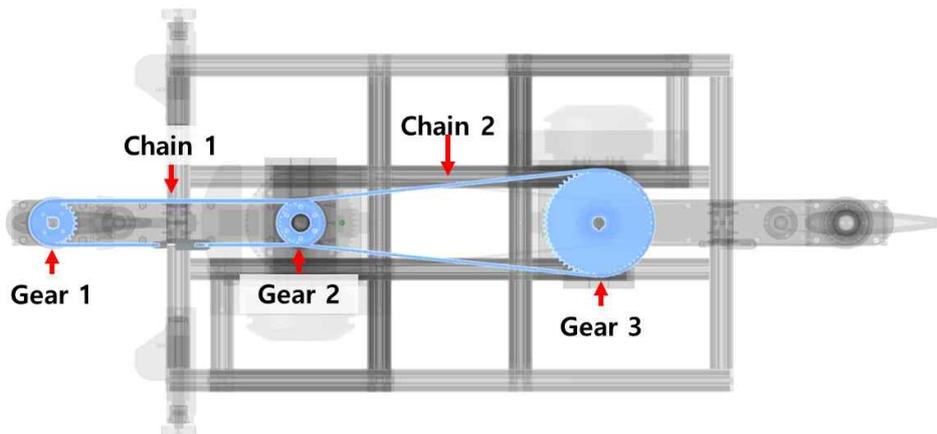


<그림 6. 플라핑 추진기 작동방식>

- 동력전달계는 그림6과 같이 앞단 수중익의 피치(pitch) 각의 변화에 따라 뒷 단 암(arm)의 각도가 정해지면서 하계 완전히 자가수동적(fully passive)으로 동작되도록 구성하였음
- 앞단 수중익의 피치 각 변화에 따라 Gear 1이 회전하게 되면 Chain 1을 통해 2중 기어인 Gear 2가 회전함
- Gear 3은 Chain 2에 의해 Gear 2와 연동하며 Rear Arm Shaft를 회전시키게 되고 이를 통해 Rear Arm이 동작하게 됨
- 이때 Gear 2와 Gear 3의 기어비는 1:2.2이며 이를 통해 앞 단 수중익의 피치 각도와 뒷 단 암의 회전 각도의 비를 결정하게 됨
- 뒷 단 수중익과 앞 단 암의 경우에도 동일한 방식으로 동작되도록 구성하였음



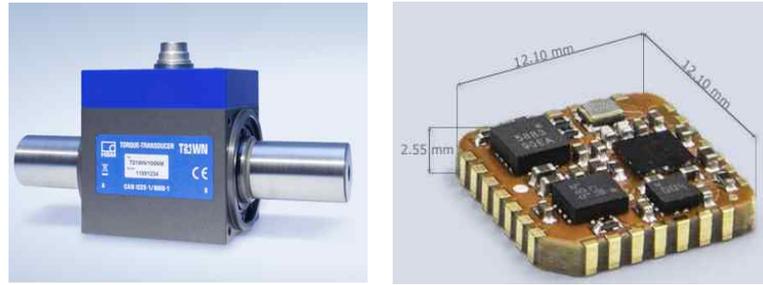
<그림 7. 플랩퍼 장치 동력전달계 구성(측면도)>



<그림 8. 플랩퍼 장치 동력전달계 구성(평면도)>

다. 센서 및 제어기

- 부하(load)
 - 최대 24V까지 부하(load)를 인가할 수 있는 파워더 브레이크 2기
- 계측
 - 부하인가 단계 생성되는 축 토크 및 회전수(RPM) 측정 센서
 - 자세 및 진동을 계측하는 자세방위(AHRS) 센서
 - 암 또는 수중익의 각도를 측정하는 엔코더(Encoder)



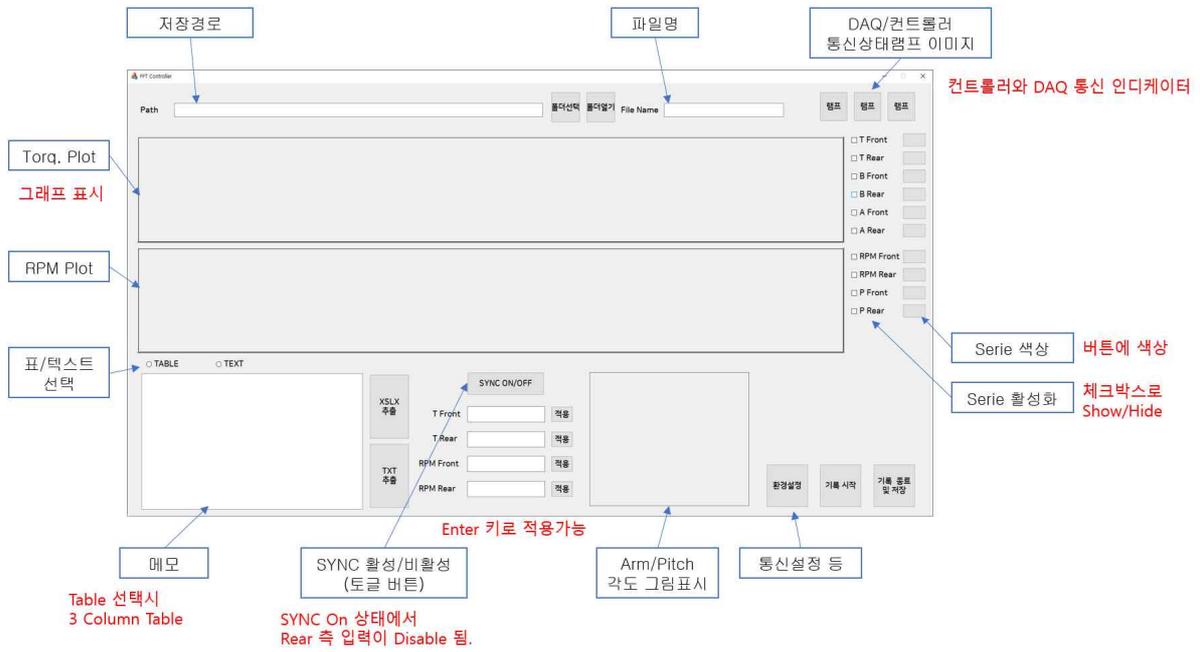
<그림 9. 기계부에 부착된 센서 형상, (좌) Torque-RPM Sensor, T20WN, HBM Inc.
(우) AHRS 센서 MTi-3 DK, Xsens>



<그림 10. 기계부에 부착된 센서 (좌) 파워더 브레이크, (우) Controller,
(아래) DAQ>

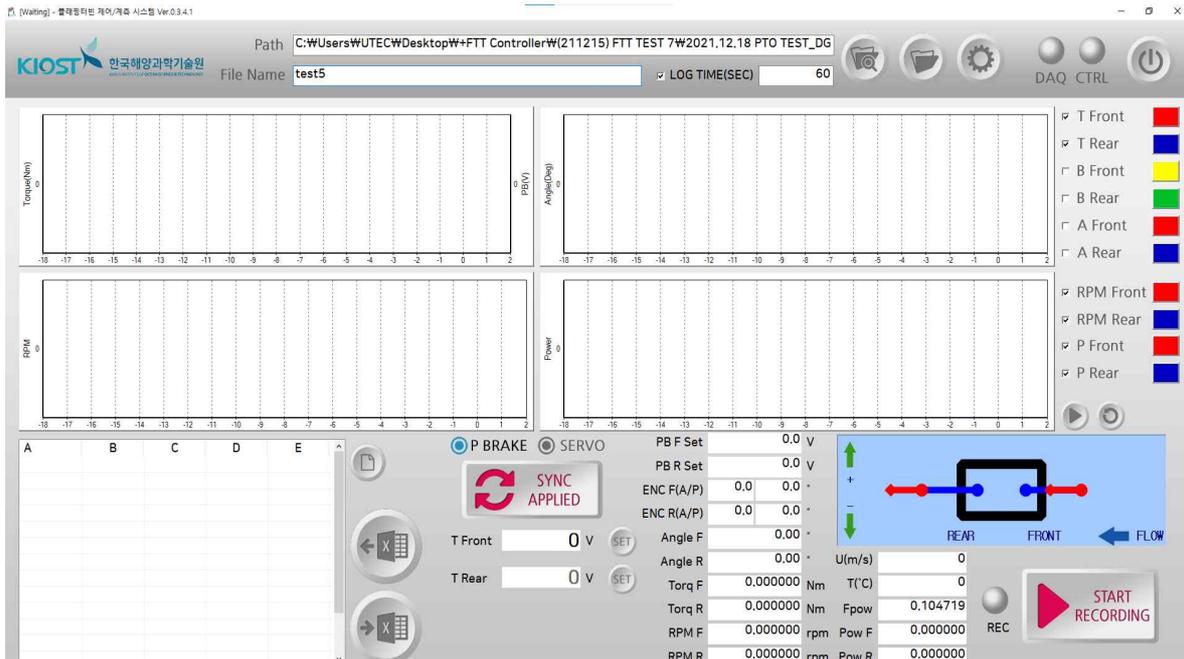
라. 계측 및 제어 S/W 제작

- 원하는 데이터 값을 얻기 위하여 계측할 장비에 사용할 통합 프로그램을 자체적으로 구축 및 제작하였으며, 동기화는 최대 1kHz 대응하며 실시 시간의 경우 한국표준과학연구원(KRISS)의 시간동기화 서버를 사용하도록 구성



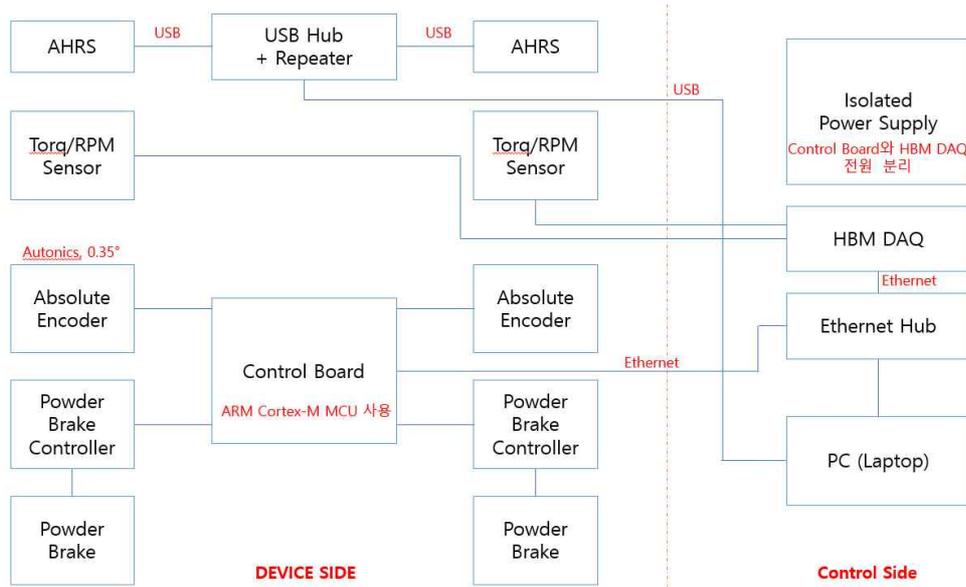
<그림 11. 초기 GUI 구성 및 각 기능 설명>

- GUI 최종버전( FTT_Controller_V342.exe)



<그림 12. 최종 GUI 구성>

- 센서 및 장치 연결 개요도



<그림 13. Block Diagram>

- 사전 작성 및 검토된 시험평가절차서(ITP)에 의해 실험용 모델의 제작 상태, S/W 연동 등을 점검하였으며, 이에 따른 보완사항을 버전 별로 수정하여 안정화를 시킴
- S/W의 경우 C#을 통해 호환성을 도모하였고, 실험용 모델의 경우 각 구조부와 접합부, 그리고 소재등이 충분한 실험 기간동안 사용될 수 있도록 상세설계 및 제작하였음.

 시험 검사 계획서 Inspection and Test Plan	문서 종류	FTT 기계부 유동가시화 장치 설계 S/W 최적화시스템
	작성 일자	2021.08.18. Draft (문종민) 2021.08.17. Revision (문종민) 2021.08.18. Final ver. (임지훈)

 시험 검사 계획서 Inspection and Test Plan	문서 번호	FTT 기계부 유동가시화 장치 설계 S/W 최적화시스템
	작성 일자	2021.08.18. Draft (문종민) 2021.08.17. Revision (문종민) 2021.08.18. Final ver. (임지훈)

■ Power Plot(Rear)

번호	시험 항목	결과
1	전원장치에 Power.Plot 에 대한 값이 인가되는가?	
2	Power.Plot 그래프가 Input 값에 대하여 정상적인 Output 이 도출되는가?	
3	Power.Plot 그래프 활성화/비활성화시 체크박스에 대한 Show/Hide 가 정상적으로 적용되는가?	
4	Power.Plot 에 대한 색상변화가 정상적으로 나타나는가?	
5	Power 결과 값이 정확하게 산출된 것인가? □ 토크 X 회전수*(2pi*60)	

■ Arm/Pitch 가시화

번호	시험 항목	결과
1	인가된 힘에 대하여 정확하게 가시화 값이 출력되는가?	

■ Export Data

번호	시험 항목	결과
1	Memo Plot - Column Table 추출이 잘 되는가?	
2	1)기록시작 2)기록종료 및 저장이 잘 되는가?	
3	저장된 데이터가 원하는 Column 대로 추출되는가? - 시간/토크 1/토크 2/회전수 1/회전수 2/엔코더 1/ 엔코더 2/파워 1/파워 2	
4	플터 및 과일이 입력한 이름대로 저장되는가?	
5	각 행과 열은 건너뛰기 없이 잘 저장이 되는가?	
6	반복적인 저장을 위한 클릭을 진행 시, 파일은 분리되어 저장되는가?	
7	파일은 MATLAB 혹은 Octave 에서 읽을 수 있는 Float 으로 쓰여져 있는가?	
8	예외파일은 잘 기록되는가?	

1.1.5.2. 시험구성(DAQ/GUI)

FTT 장비에 부착되어 있는 센서들의 데이터 값을 얻기 위한 장치이며, 수조 실험에 투입하기 전 육상 시험에서 장비 발육별 상태 값 출력 및 제어기능을 점검한다.



그림 2. 시험구성도(GUI)

1.1.6. 시험 절차

1.1.6.1. DAQ(GUI)

■ 장치에 전원이 정상적으로 인가되는가?

번호	시험 항목	결과
1	전원장치에 정상적으로 전원이 인가되는가?	
2	컨트롤러와 DAQ 통신이 잘 진행될 때 통신상태 윈도우에 의도했던 반응이 나타나고 있는가?	
3	Sync 버튼으로 On/Off 조작시 활성화/비활성화가 잘 이루어지는가?	
4	엔더로 Torque, RPM 값이 입력되는가?	
5	플터입기 버튼 작동여부	
6	T, RPM 값 입력시 상·하한값은? (Error 가 발생하는 값 범위가 있는가?)	

<그림 14. 시험평가절차서(ITP) 발취>



<그림 15. 현장 성능 시험 전경>



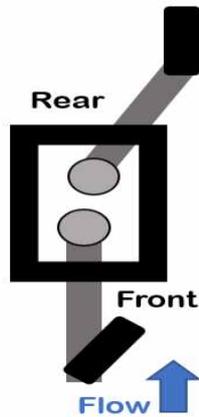
<그림 16. 설치 전 최종 육상 시험 및 노이즈 테스트 전경>

- 수중로봇복합실증센터 내 대형 회류수조에 설치 및 시운전을 수행함
- 설치를 위해 모형시험 구속용 트레이스(traverse)에 시험체를 구속시키고, 그 후 대형회류수조 작업대차 상부에 있는 이송 및 제어용 트레이스에 이중 구속을 시켜 3축(x, y, z) 방향으로 인자(parameter)를 바꾸어 가며 시험을 수행할 수 있도록 구성함.



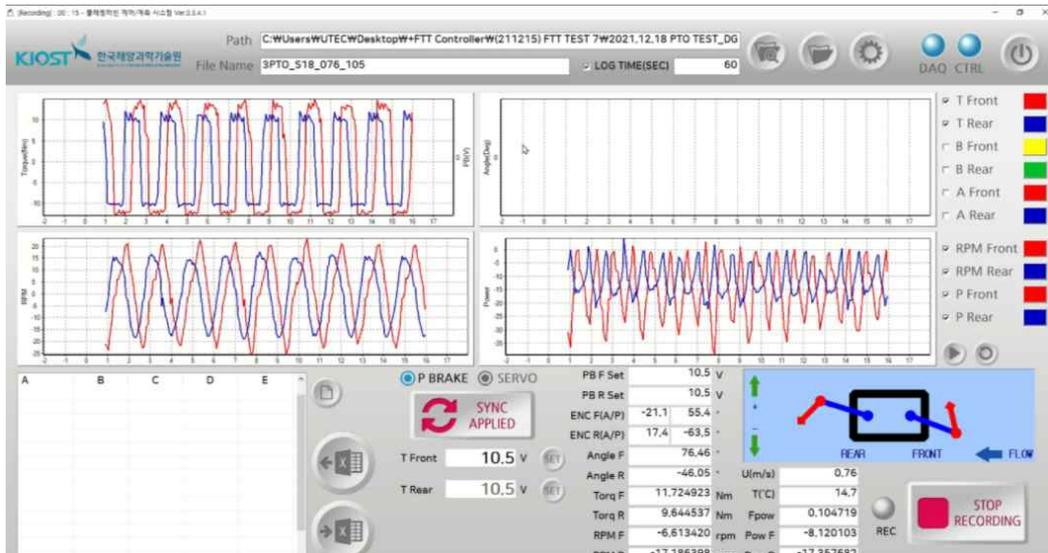
<그림 17. 설치 및 시운전>

- 플래퍼 추진기의 가동 조건 확인
 - 자가구동(Self-Starting) 조건을 정의하였음. 자가구동은 유속의 흐름 방향으로 앞 단 암의 수중익이 최대 각도를 갖도록 고정시켜 흐름에 의해 수중에서의 양력 조건을 극대화 시키는 조건을 일컫음. 이를 통해 플래퍼 추진기의 최소 가동 조건 확인할 수 있음.



<그림 18. 자가구동 초기 조건 정의>

- 자가구동을 극대화 시킬 수 있는 복원력을 고려할 필요가 있으며, 이에 적합한 스프링(Spring)을 복원력 대체재로 활용함. 이에 1)스프링 2)부하토크 값을 변경하여 Self-Starting시 요구되는 출력을 도출함.



<그림 19. 자가구동 초기 셋업 및 계측 시, GUI 화면 예>

마. 다중 플래퍼 간 인자(거리, 부하 등)에 따른 추진성능 검증

- 실험유체역학적 접근을 통하여 추진 성능에 영향을 주는 인자들과 유동특성을 사전 파악하여 플랩핑 추진체의 설계 데이터를 확보
- 길이 20 m, 너비 5 m, 깊이 5 m의 회류수조에 플랩퍼를 설치하여 암의 회전에

적용되는 스프링 상수, 암의 축에 걸리는 부하에 따른 성능 평가를 실시함

- 실험유속은 0.76 m/s이며 이에 따른 레이놀즈수(Re)는 식 1과 같이 정의되며 1.32×10^5 임

$$Re = \rho U_{\infty} c / \mu \quad (\text{식 1})$$

, ρ : 물의 밀도, U_{∞} : 실험유속, c : 코드 길이, μ : 물의 점도

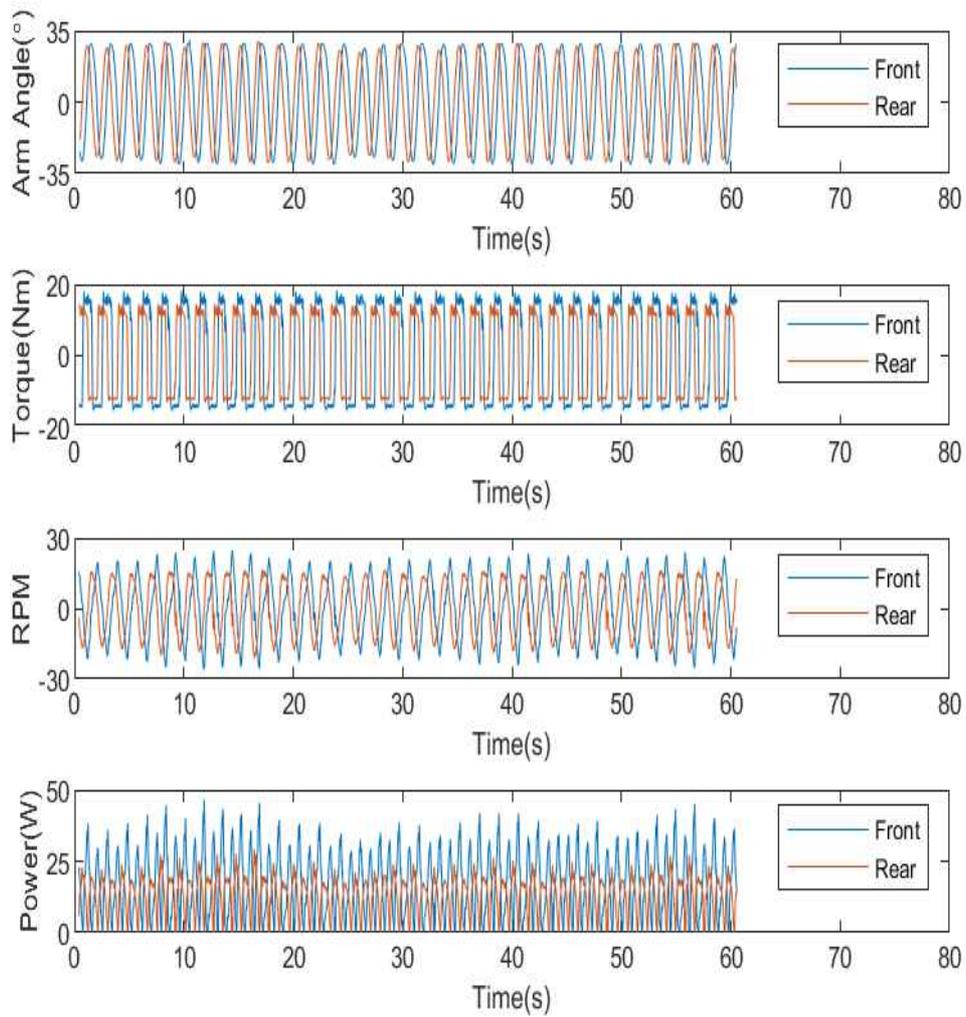
- 플랩퍼 동작 중 암이 운동 방향 전환 시 스톱퍼와 충돌하여 운동 에너지가 소산되는 문제가 있음. 암에 스프링을 장착하여 암의 운동 방향 전환 시 운동 에너지를 스프링의 위치 에너지로 변환하여 충돌을 방지하고 이에 따른 성능 분석을 진행함. 스프링 상수는 0, 1.5, 1.8, 2.0 N/m로 변경하며 위치 에너지 전환에 따른 영향을 비교함
- 추진에 필요한 토크를 모사하여 이에 따른 성능에 대한 영향을 보기 위하여 Arm Shaft에 걸리는 부하는 파우더브레이크를 통해 인가하였으며 이를 토크 센서를 이용하여 계측함
- 실험 인자에 따른 플랩퍼 암의 주기적인 운동을 환산진동수(f^*)를 통해 무차원화하였음

$$f^* = fc / U_{\infty} \quad (\text{식 2})$$

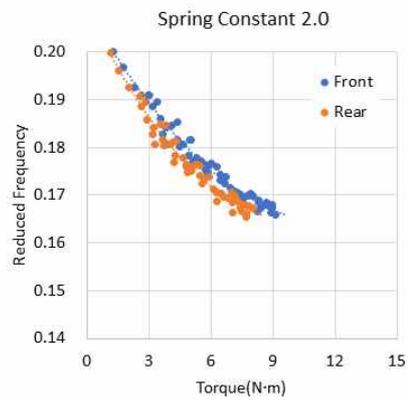
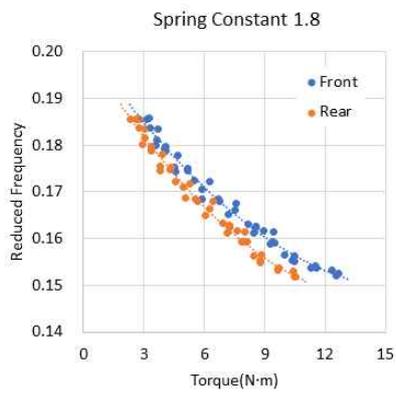
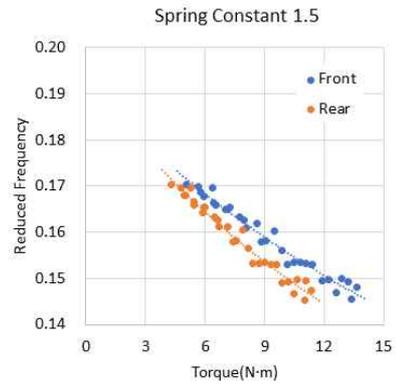
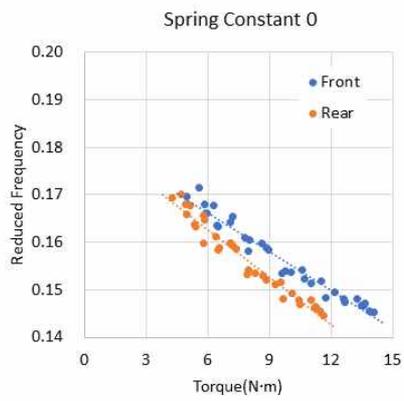
, f : 암의 진동수 (주기의 역수)

- 그림 20은 굵기 1.5 mm 스프링에서의 플랩퍼의 측정 결과 중 하나임
- 암의 각도는 스톱퍼에 의하여 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 로 제한되며 시간에 따라 주기적으로 작동함을 알 수 있음
- 앞 단 암의 축과 뒷 단 암의 축에 작용하는 부하는 주기적인 변화를 보이며, 앞 단이 더 많은 부하가 걸리는 것을 알 수 있음. 이는 CFD에서도 검증할 예정임. 주요한 원인으로서는 뒷단 플랩퍼의 경우 앞단 플랩퍼의 운동 과정에서 에너지 손실이 발생한 유동에 의해 동작하기 때문임. 이러한 문제를 해결하기 위해 다수의 생명체는 와류와 손실을 최소화 할 수 있는 대형을 갖추거나 플랩퍼의 다중 배치가 이루어져 있음(*거북이, 철새 비행 등)
- RPM의 경우도 부하의 경우와 마찬가지로 뒷 단 암에서의 값이 더 낮음을 알 수 있음

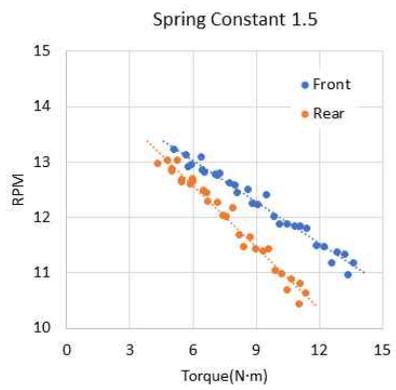
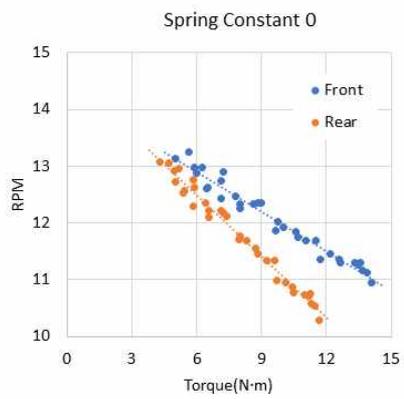
- 최종적으로 추진에 필요한 데이터를 종합하면 앞 단의 시스템에서 더 높은 요구 출력(20~22.5%)이 작용함을 알 수 있음

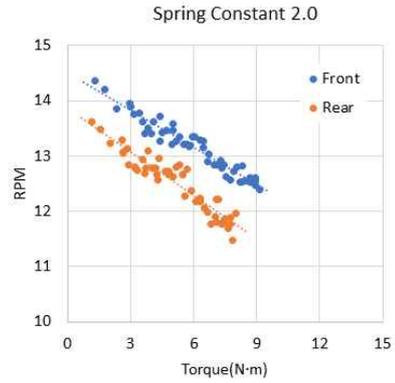
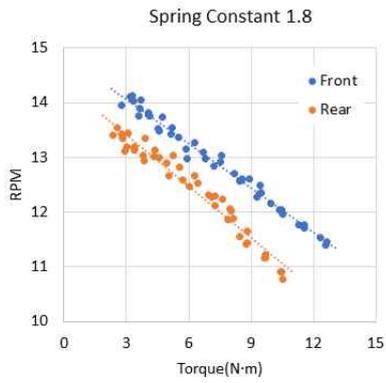


<그림 20. 토크, RPM, Power, Arm angle 측정 결과(스프링 굵기 1.5 mm)>

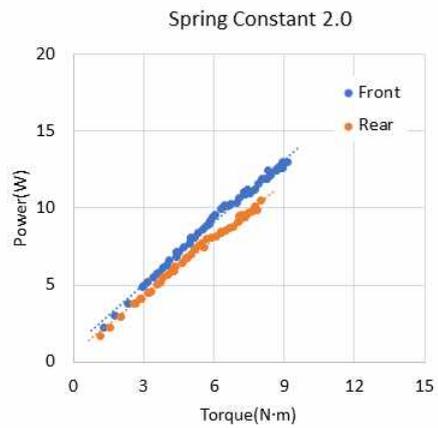
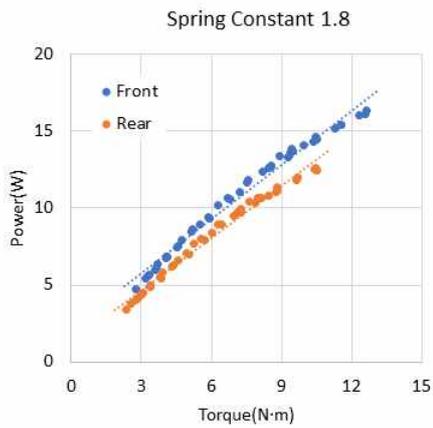
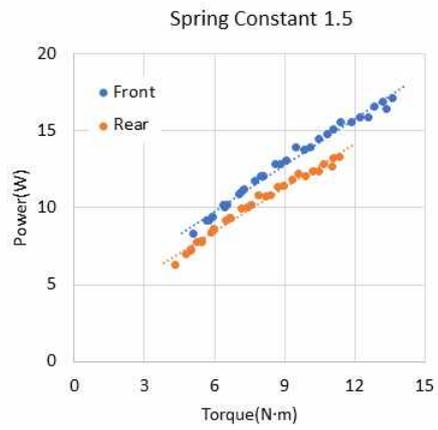
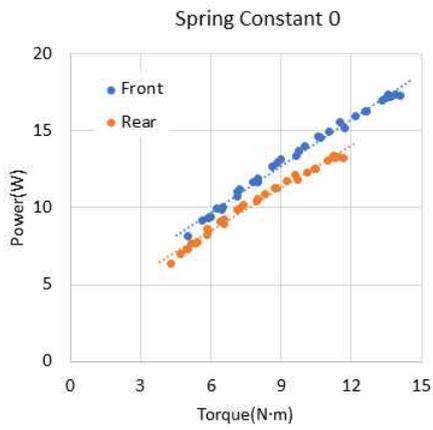


<그림 21. Arm Shaft 부하에 따른 환산진동수>





<그림 22. Arm Shaft 부하에 따른 RPM>



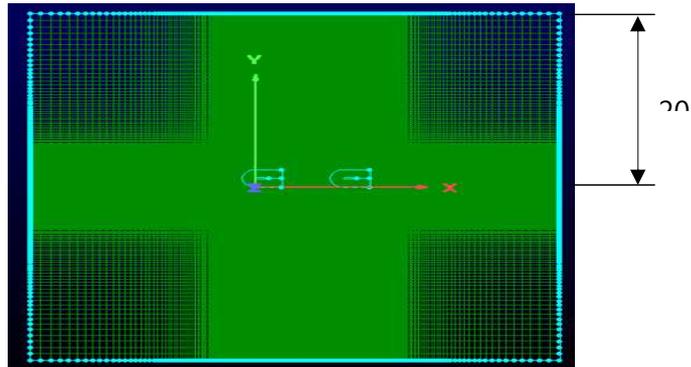
<그림 23. Arm Shaft 부하에 따른 추진 요구 출력>

바. 전산수치해석 및 실험유체역학기법을 통한 비교해석 수행

(1) 유동해석 수행 및 실험 결과와 비교분석

- CFD 코드 검증을 위해 Mesh를 선정함

1) Domain mesh : 538x367(20C x 20C) 196,542

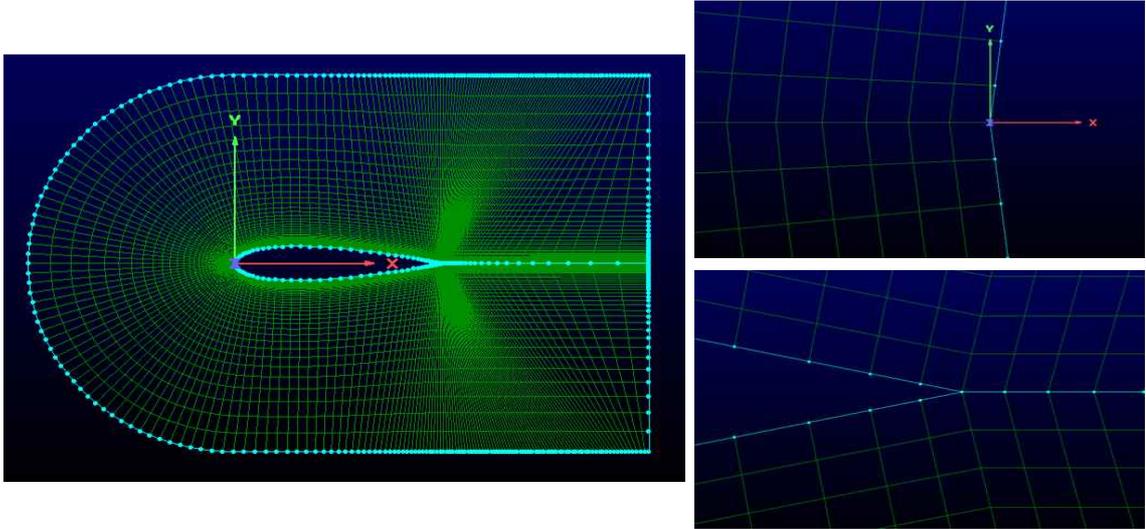


<그림 24. domain mesh>

2) Body-fitted mesh : first layer thickness: 1e-4, 검증을 위해 mesh의 cell개수를 case 1을 기준으로 50%씩 증가시킨 총 3개(100%, 150%, 200%)의 case를 사용

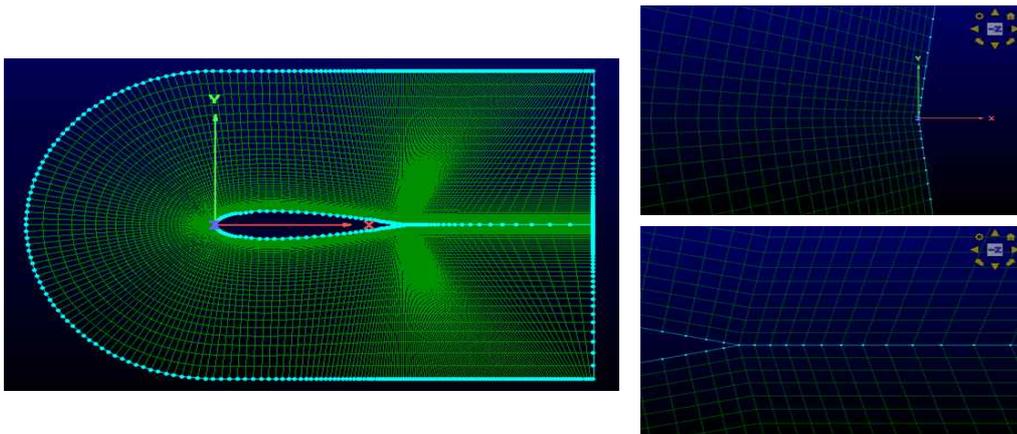
case #	mesh size	number of cell	%
case 1	257 x 68	17,152	100%
case 2	315 x 83	25,748	약 150%
case 3	361 x 95	33,840	약 200%

* case1 : 100% 257×68(17,152)



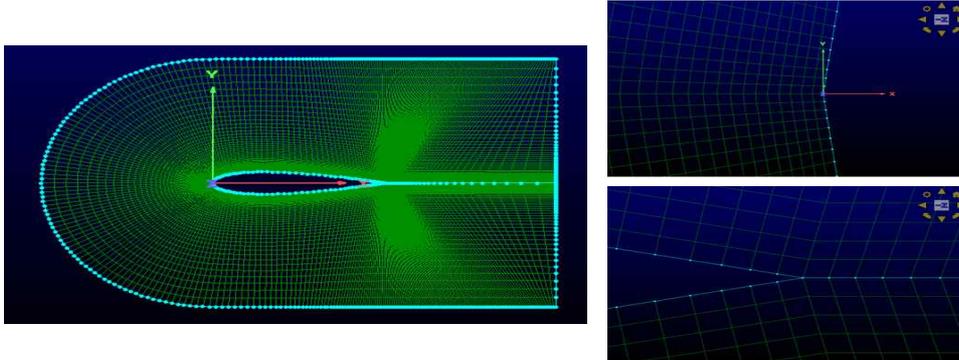
<그림 25. case1 mesh detail>

* case2 : 150% 315×83(25,748)



<그림 26. case2 mesh detail>

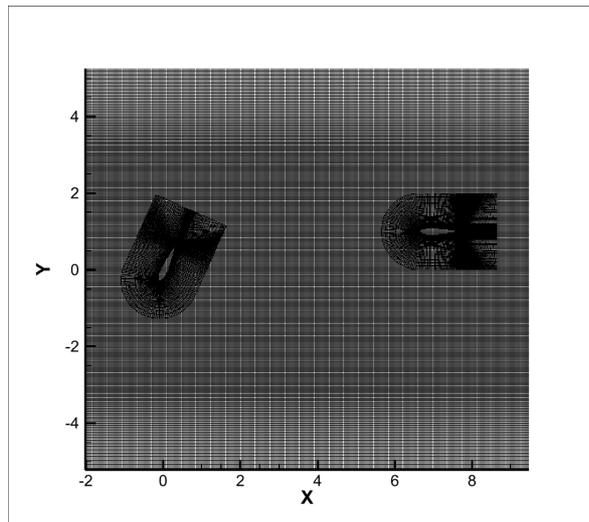
* case3 : 200% 361×95(33,840)



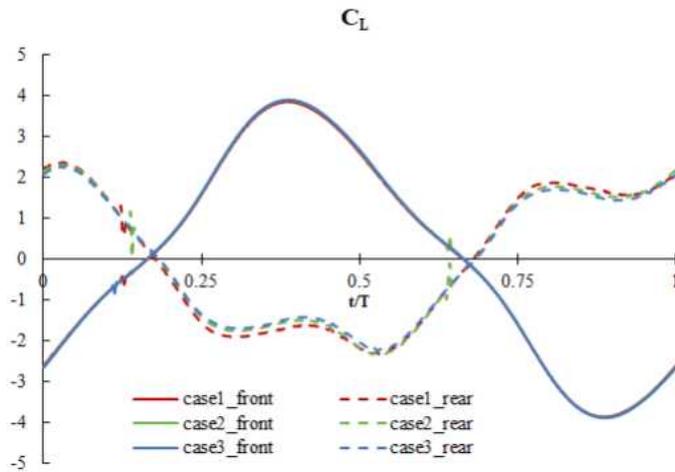
<그림 27. case3 mesh detail>

(2) 검증결과

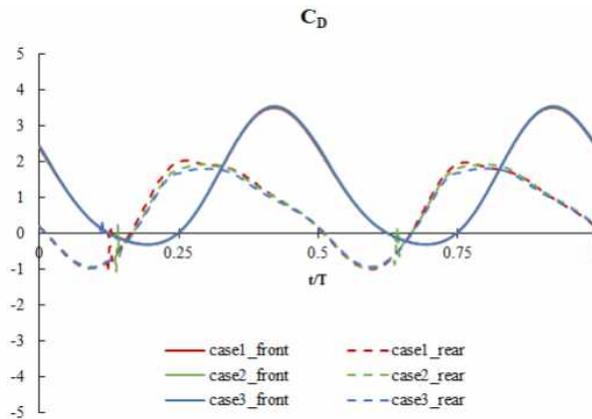
- 해석 시 초기위치($t/T=0$)는 아래의 그림과 같이 설정함.



<그림 28. mesh position ($t/T=0$)>



<그림 29. comparison of CL >

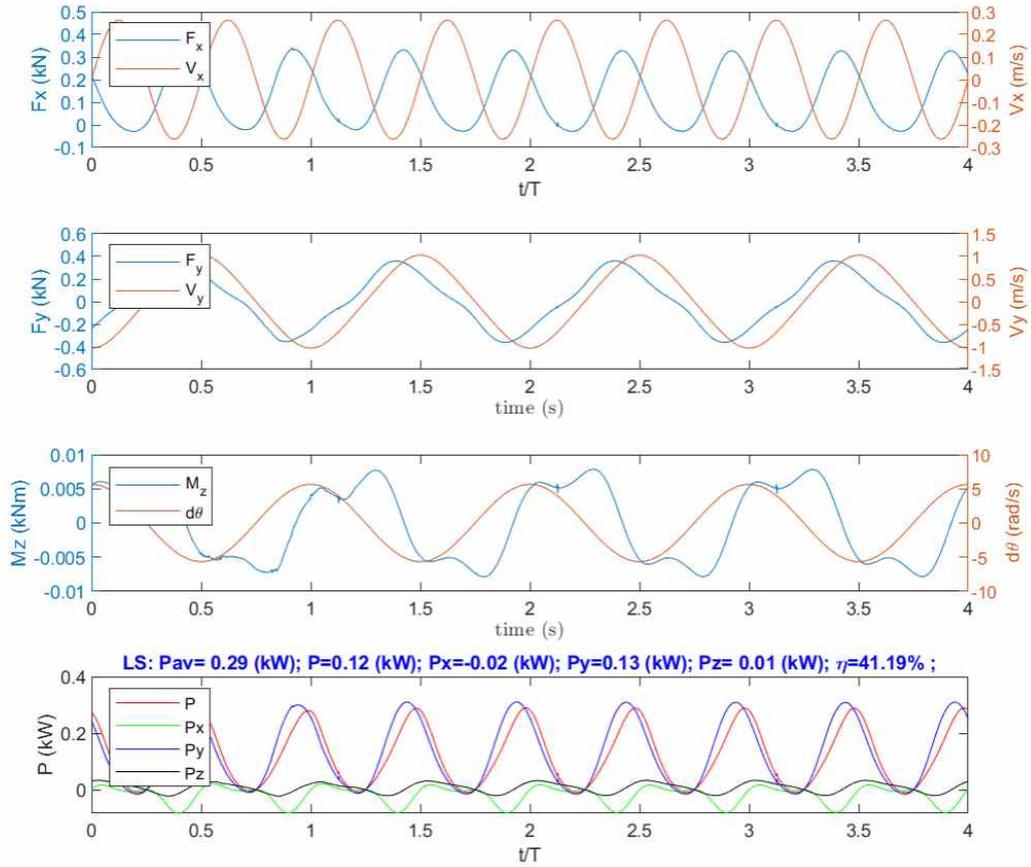


<그림 30. comparison of CD >

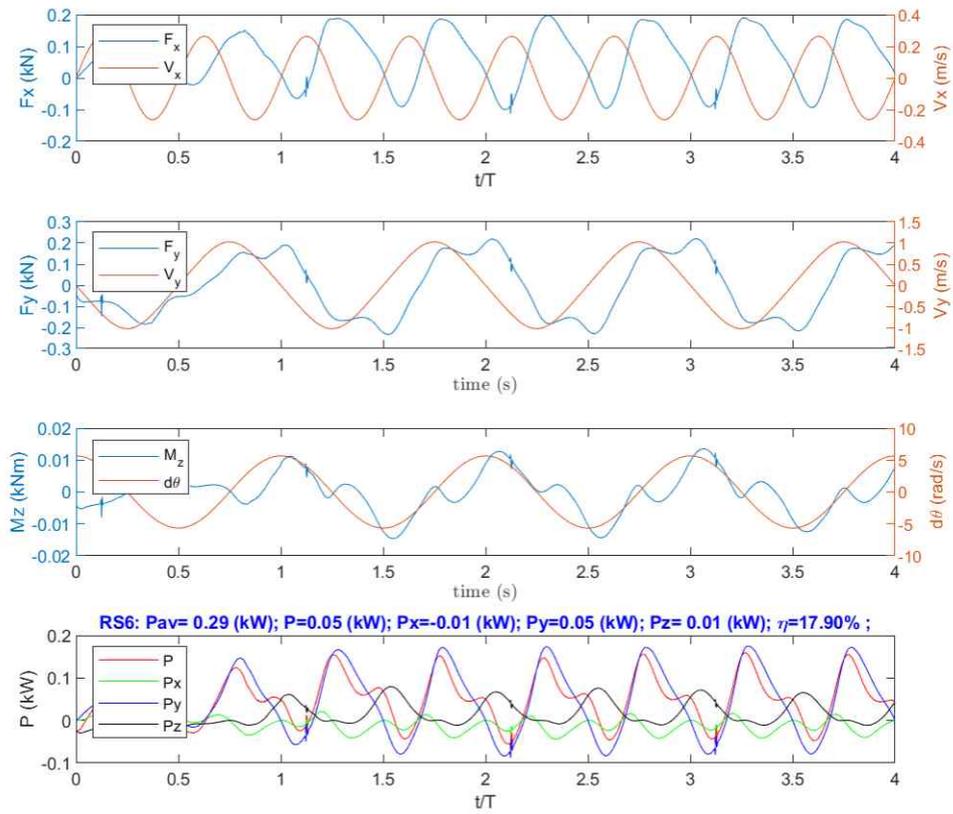
- CL과 CD그래프의 $t/T=0.125$ 와 0.625 의 부근에서 보이는 진동의 경우 body-fitted mesh와 domain mesh의 경계에서 수치적인 오차에 의해 발생한 것으로 판단됨
- case1과 case3의 피크 점에서 오차를 확인해 보았을 때 front hydrofoil의 경우 CL은 1.2%, CD는 1.3%의 결과가 나왔고, rear hydrofoil의 경우에는 CL은 3.5%, CD는 11.2%의 오차율을 보임
- 현재 사용한 domain mesh에서는 지금의 hydrofoil mesh 형태가 잘 맞는 것으로 확인됨
- 해석시간의 경우 case1을 기준으로 case3은 두 배 이상 소요되고 결과는 차이가 크지 않으므로 이후의 해석에서는 case1을 사용함

(3) 출력결과

· Matlab 계산 코드의 출력 결과 : Matlab 코드를 이용하여 Left-Swing과 Right-Swing 궤적의 플랩퍼가 작용하는 힘과 출력을 계산함 (계산식 source: Sitorus and Ko, 2019)

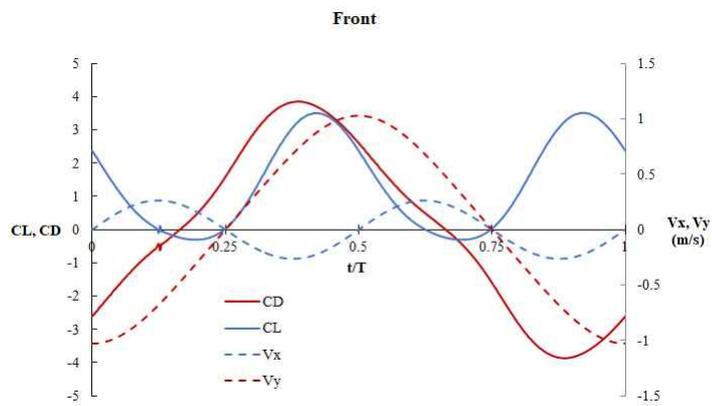


<그림 31. Front hydrofoil >

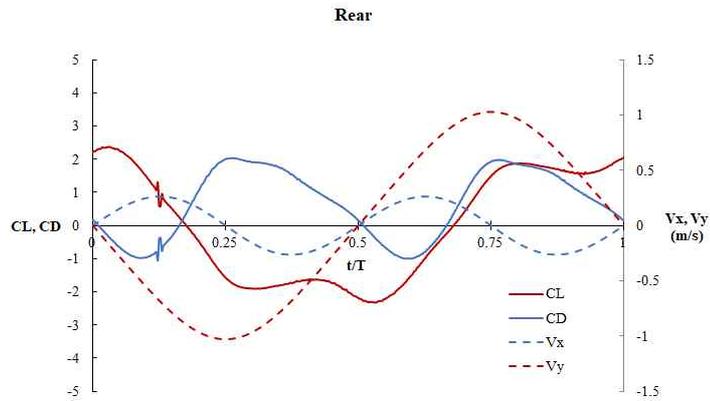


<그림 32. Rear hydrofoil >

(4) 속도



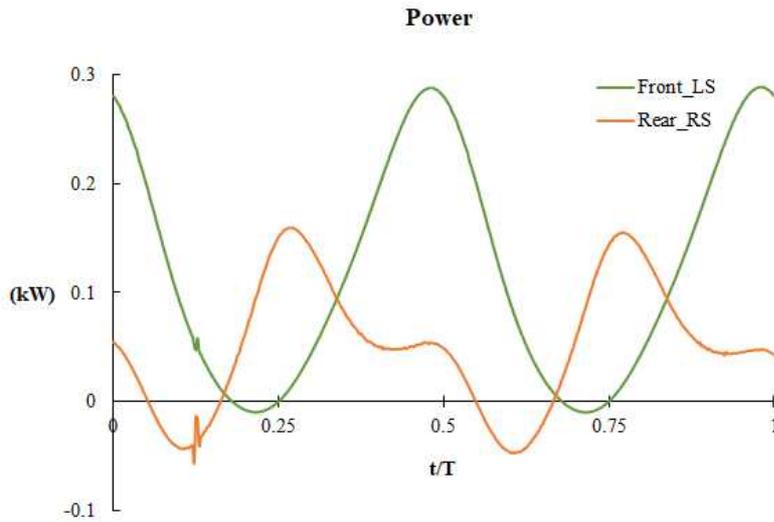
<그림 33. CL, CD, Vx and Vy data of Front >



<그림 34. CL, CD, Vx and Vy data of Rear >

- 앞단과 뒷단의 수중익의 사이클을 비교해보면 Vy Phase가 90%로 잘 출력된 것을 확인할 수 있음
- Vx의 경우 앞단과 뒷단 수중익이 모두 시작점인 $t/T=0$ 에서 $t/T=0.25$ 까지 하강하며 유동 유입 방향으로 움직이므로 양의 값을 갖고, 이후에도 x축으로는 같은 속도로 움직임

(5) 출력



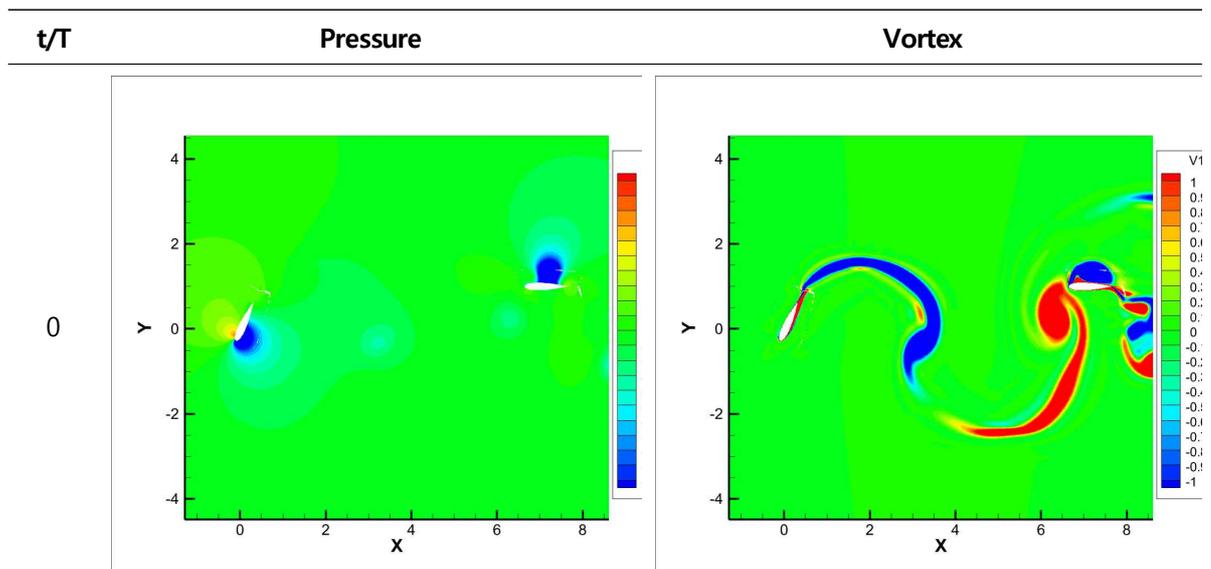
<그림 35. Comparison of Power >

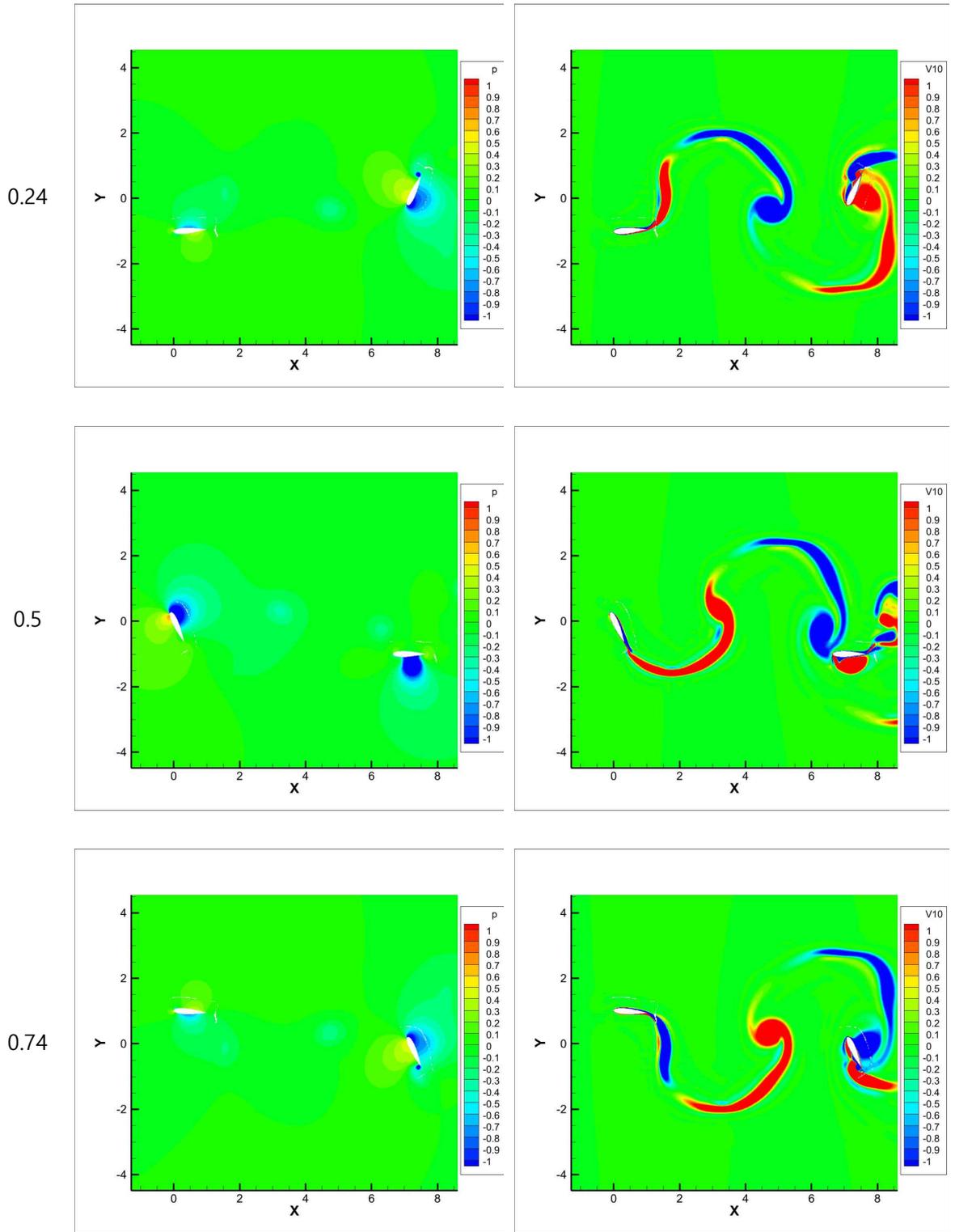
- 비교결과 앞단 수중익의 출력이 최저점일 때($t/T=0.25, 0.75$) 근처에서 뒷단 수중익의 출력이 최고점이 됨

- Phase가 90%로 잘 출력된 것을 확인할 수 있음
- 계산결과 앞단 수중익의 요구 출력비(유동에너지 대비)은 41.2%, 뒷단 수중익의 경우 17.9%으로 실험결과와 유사한 경향과 수치를 갖는 것을 확인함

(6) 압력, 후류

- 압력과 후류의 영향을 확인하기 위해 총 4개 구간($t/T=0, 0.24, 0.5, 0.74$)을 정리함
- 출력데이터가 $t/T=0.02$ 간격으로 출력되므로 부득이하게 0.25와 0.75의 근삿값인 0.24와 0.74를 사용함
- 후단 수중익은 right-swing 궤적으로 left-swing 궤적보다 출력이 작으며(Sitorus and Ko, 2019) 또한 후류의 영향을 받아 앞단 수중익에 비해 출력이 줄어든 것으로 파악됨





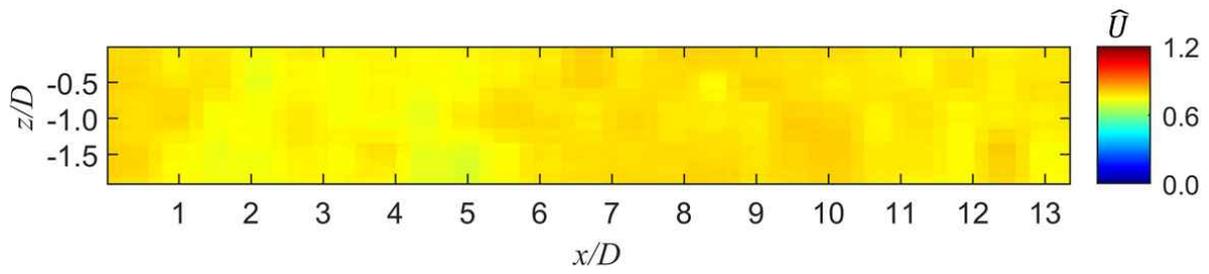
<그림 36. Pressure and Vortex contours ($t/T=0, 0.24, 0.5, 0.74$)>

(7) 입자영상유속계(PIV)를 이용한 생체모사 플래퍼 추진기의 유동가시화 및 해석

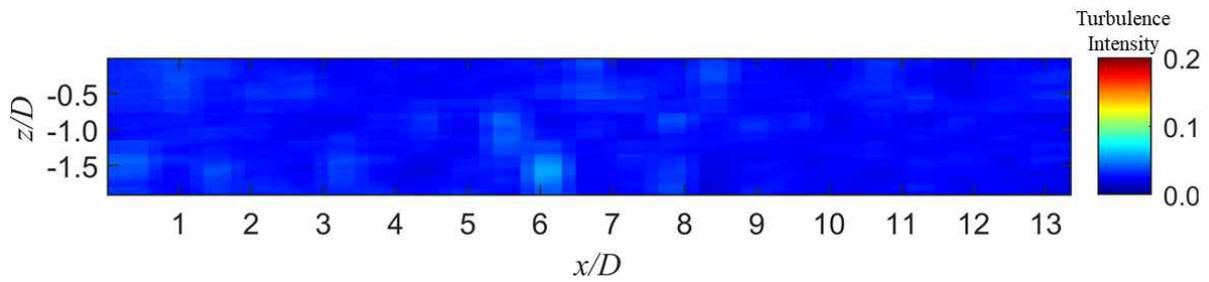
- 입자영상 유속계의 회류수조 실험 시설의 사전 검증을 위해 유속 및 난류강도에 대한 불확실성 시험을 수행
- 시험체를 설치하는 위치는 수심 5 m 수조에서 수심 1.7 m이고 폭 5 m 수조 벽으로부터 3.4 m 이격되어 있으며, 카메라와 시험체 중심까지의 수평 거리는 2.4 m임
- 수중 잠항식 입자영상유속계(UW-SPIV)를 x 및 z방향으로 0.4 m씩 이동하여 촬영을 진행하였으며 x 방향으로 23 구간, z 방향으로 3 구간 촬영함
- FoV는 0.54 m × 0.54 m이며 공간분해능(Spatial Resolution)은 105.80 × 105.80 μm/pixel임
- FoV 구간들의 Overlap 구간은 x 및 z방향으로 각각 0.14 m씩임
- 총 촬영 영역은 x 방향으로 9.35 m, z 방향으로 1.34 m임
- PIV 촬영에 앞서 PIV 촬영 영역에 대한 평균 유동을 확인하기 위해서 시험체가 없는 평균 유속과 난류강도에 대한 분석을 진행함
- 설정 유속은 각각 최소 자가구동과 그 이상에 해당(실해역) 해당되는 0.77 m/s과 1.01 m/s임
- 촬영 영역에서 Overlap 구간의 유동 벡터 값은 해당되는 FoV 구간들의 산술평균을 통하여 계산하였음
- 유동의 품질(불균일성)을 나타내는 난류강도(Turbulence Intensity)는 식 3과 같이 정의 됨(I : 난류 강도, U : 유속, σ_U : 유속의 표준편차)

$$I = \frac{\sigma_U}{U} \quad (\text{식 3})$$

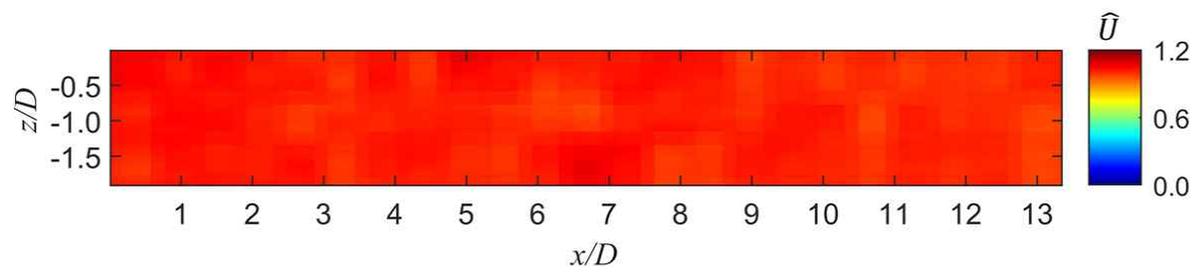
- 최소 자가구동 영역에서의 평균 유속(\hat{U})은 0.77 ± 0.020 m/s이고 난류강도는 0.028 ± 0.0050 임
- 실해역 모사 평균 유속은 1.01 ± 0.020 m/s이고 난류강도는 0.038 ± 0.0055 임



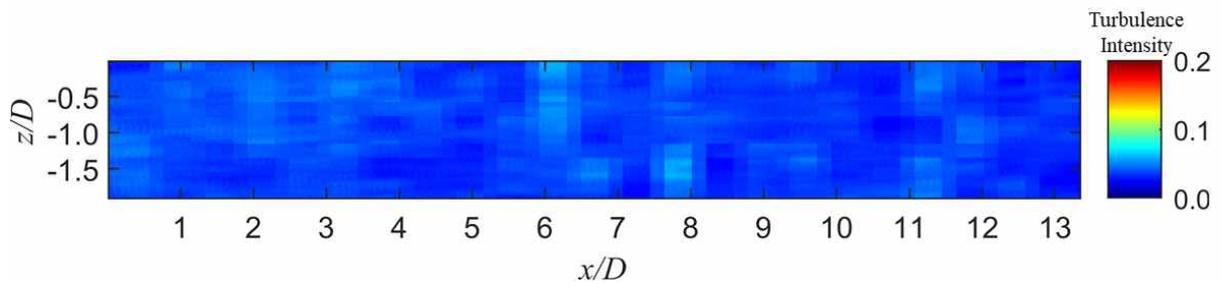
<그림 37. 0.77 m/s에서의 유속 분포>



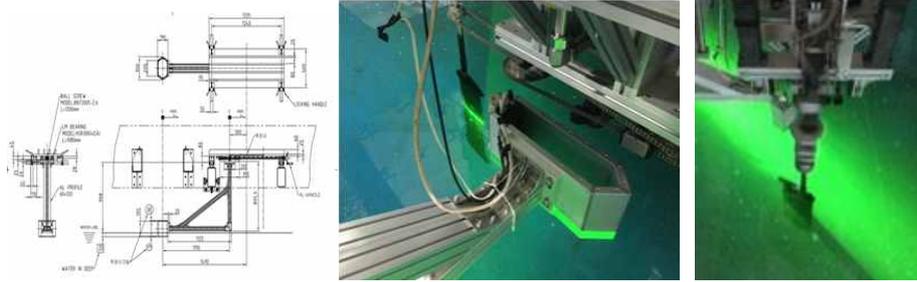
<그림 38. 0.77 m/s에서의 난류강도>



<그림 39. 1.01 m/s에서의 유속 분포>

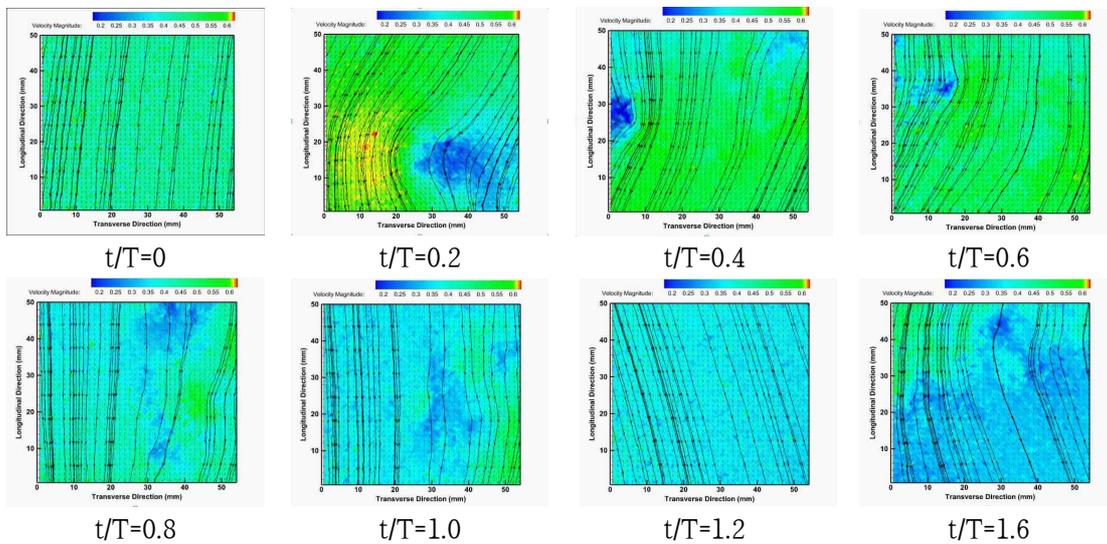


<그림 40. 1.01 m/s에서의 난류강도>



<그림 41. 설치된 PIV 시스템 전경>

- 수중익이 작동하는 동안 제어부에서는 한 주기당 사용자가 1024 간격의 임의 펄스 신호 획득을 할 수 있도록 제어기를 구성
- PIV의 경우 synchronizer와 repetition rate 문제로 인해 phase average를 할 수 있도록 별도의 임베디드 보드를 구성하였음
- 평균 20개의 이미지 조합을 1개의 특정 시점과 각도로 이미지 분석을 수행함



<그림 42. 주기에 다른 수중익 PIV 결과 일부 발췌>

- 와류가 수중익에서 떨어져 나가는 지점은 실험과 비슷한 수준인 45-60도 사이의 피치각에서 발생을 확인
- 와도 강도의 경우 좌우를 진동하며 암각이 가장 높은 상태가 되었을 경우, 즉 최대 암 각도를 가진 상태에서 반대 암각으로 움직이는 순간에 있어 가장 강도가 심하게 나타나는 것을 관찰함
- 상기 결과는 수치해석 결과와 유사하며, 속도장과 압력은 반비례 관계이므로 피치각이 45-60도에 이를 시, 수중익 표면 압력장이 극도로 변화가 심함을 유추할 수 있음. 이로 인해 수중익의 표면 부근에서 와도가 생성되어 떨어져 나오는 것으로 해석 할 수 있음.

제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 향후 본 과제를 통해 해양로봇을 이용한 다양한 후속 연구개발 발굴 초석을 마련할 수 있으며, 신규사업(2022년) 응모와 대형과제 발굴을 위한 기획과제(2023~2024년 예산 목표)계획을 세우고 있음.
 - 분야: 해양로봇, 에너지, 국방기술, 소재·부품·장비
 - R&D 주무부처: 해양수산부, 국방기술품질원, 다부처 사업

제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

가. 해양로봇 소재·부품·장비에 해당하는 요소기술과 사업 개발

- 소재·부품·장비(이하 ‘소부장’)에 관련한 설계인자와 원천연구 결과 확보
- 소부장 사업 기획, 발굴 및 응모를 위한 초석 마련

나. 해양과기원의 최고 수준 인프라를 이용한 양질의 연구결과 도출 및 홍보

- 기 구축된 인프라를 적극 활용한 양질의 논문 생산
- 연구인프라 시설 대외홍보 제고 (인프라 활용성 증대 도모)

다. 4차산업혁명을 견인할 주요사업 및 R&D 사업 개발

- 원내 주요사업등에 적극 활용하여 새로운 연구개발 아이템(융복합) 제시
- 대형 R&D(해양수산부, 국방기술품질원, 다부처 사업 등) 기획, 발굴 및 응모에 활용

제 6 장. 참고문헌

1. J. Yu, L. Wang, Parameter optimization of simplified propulsive model for biomimetic robot fish, in: Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on, IEEE, 2005, pp. 3306 - 3311.
2. Knoller, R., 1909. Die Gesetze des Luftwiderstandes. Flug- und Motortechnik (Wien) 3(21), 1 - 7.
3. Betz, A., 1912. Ein Beitrag zur Erklärung des Segelfluges. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt 3, 269 - 272.
4. Wu, Xia, et al. "A review on fluid dynamics of flapping foils." Ocean Engineering 195 (2020): 106712.
5. Lua, K.B., Lim, T.T., Yeo, K.S., 2011. Effect of wing - wake interaction on aerodynamic force generation on a 2D flapping wing. Exp. Fluid 51 (1), 177 - 195.
6. Kumar, R., Shin, H., 2019. Thrust estimation of a flapping foil attached to an elastic plate using multiple regression analysis. Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. 11 (2), 828 - 834.
7. James A. Bowker, Coupled Dynamics of a Flapping Foil Wave Powered Vessel, University of Southampton, Doctoral Thesis, 2018, p. 251.
8. Xu, Jianan, et al. "Energy extraction performance of motion-constrained tandem oscillating hydrofoils." Journal of Renewable and Sustainable Energy 9.4 (2017): 044501.
9. Yu, D., Sun, X., Bian, X., Huang, D., Zheng, Z., 2017. Numerical study of the effect of motion parameters on propulsive efficiency for an oscillating airfoil. J. Fluids Struct. 68, 245 - 263.
10. Medjroubi, W., Stoevesandt, B., Carmo, B., Peinke, J., 2011. High-order numerical simulations of the flow around a heaving airfoil. Comput. Fluid 51 (1), 68 - 84.
11. Zhu, B., Han, W., Sun, X., Wang, Y., Cao, Y., Wu, G., Huang, D., Zheng, Z.C., 2015. Research on energy extraction characteristics of an adaptive deformation oscillating wing. J. Renew. Sustain. Energy 7 (2), 023101.
12. Kinsey, T., Dumas, G., 2012. Optimal tandem configuration for oscillating-foils hydrokinetic turbine. J. Fluids Eng. 134 (3), 031103.
13. Taira, K., Colonius, T.I.M., 2009. Three-dimensional flows around low-aspect-ratio flatplate wings at low Reynolds numbers. J. Fluid Mech. 623, 187.

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.