BSPE98987

생체형상모사를 통한 진동식 조류발전기의 성능향상 연구 한국해양과학기술원

BSPE98987

생체 형상 모사를 통한 진동식 조류발전기의 성능 향상 연구 II

Performance improvement of oscillating tidal stream generator through biomimetics II

2014. 2.

한 국 해 양 과 학 기 술 원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “생체 형상 모사를 통한 진동식 조류발전기의 성능 향상 연구 II”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2014. 2 . 17

총괄연구책임자 : 고 진 환

요 약 문

Ⅰ. 제 목

생체 형상 모사를 통한 진동식 조류발전기의 성능 향상 연구 Ⅱ

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 진동식 터빈 실험 장치 개선을 통한 수치실험과의 차이를 최소화

○ 자연모사 형상 수리모형 실험 및 수치 해석을 통한 심화 연구

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

○ 진동식 터빈 실험 장치 개선을 통한 수치실험과의 차이를 최소화
- 진동식 터빈 동력 전달부 재설계 등 장치 개선
- 수치실험 진행 시 관성력을 고려한 해석 방법 이용

○ 자연모사 형상 수리모형 실험 및 수치 해석을 통한 심화 연구
- 가리비 조개의 형상을 활용하여 최적인 곡면과 주름을 얻어냄
- 기존 형상과의 비교를 통한 차이점 분석
- 상하 운동 시 형상을 다르게 하는 경우의 효율 분석과 공학적 구현 방법 연구
- 수리모형 실험 진행 및 검증

Ⅳ. 연구개발결과

○ 진동식 터빈 실험 장치 개선
- 듀얼 동력전달계 개발을 통해 통합된 듀얼 진동식 터빈 시스템을 구축함
- 예인수조 실험을 통해 유의한 설계 변수들을 도출함
- 근접 배치 발전 가능성과 파워 변동 특성 향상을 확인함

- 예측 모델 개발/검증과정과 유동해석을 수행하였고 최적화에 활용예정

○ 생체 형상 진동식 터빈 심화 연구
- 전산유체해석을 이용하여 생체형상 진동자와 기존 진동자 형상과의 효율을 비교함
- 고정형상의 경우는 7% , 가변형상의 경우 17% 효율 향상
- 가변 생체 형상 진동식 터빈의 개념설계를 통한 제작 수행
- 예인수조 실험에서 30% 효율을 얻었고, 설계 수정 사항 확인함

V. 연구개발결과의 활용계획

○ 개발된 조류에너지 실용화 기술은 상용 조류발전소 건설에 활용
○ 조류발전 시스템 관련 기술의 특허 확보로 국내외 조류에너지 개발 및 국외로의 기술 수출 가능
○ 향후 임해발전소 온배수, 하수처리장, 소규모하천 등의 흐름을 이용한 소규모 발전에 활용할 수 있는 조류발전 시스템엔지니어링 기술의 상업화 및 기술이전 가능

목 차

제 1 장 서론

제 1 절 필요성

제 2 절 파급효과

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 진동식 터빈 실험 장치 개선

제 2 절 생체 형상 진동식 터빈 심화 연구

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 및 향후계획

제 6 장 참고문헌

제 1 장 서론

제 1 절 필요성

○ 무한한 청정에너지원인 바닷물과 강물의 흐름은 매우 불규칙한 바람(미풍에서 태풍까지)이나 파도와 달리 그 크기는 1.0~2.0m/s 정도로 작지만 장시간 유지되는 양질의 에너지를 가지고 있음

○ 해양 동물의 형상을 활용하는 방식으로 단일 발전기 효율 향상을 가져와 경제성 향상에 기여함

○ 회전형 발전장치에 비하여 자연의 움직임을 활용한 발전원리로 인해 물에 떠오는 각종 쓰레기 등에 의한 장비손상의 위험도 역시 현저하게 낮음. 보수유지 비용절감 효과가 매우 높은 강점을 가짐. 또한 우수한 환경친화성으로 사람-자연 충돌 최소화

○ 기존 강체 진동식 조류발전기는 영국에서 2013년 전기를 생산하는 계획을 가지고 있으며 추후 활용 발전 연구가 가속화 될 것으로 예상되는 시점에서, 더 나아간 형태인 생체 형상 진동식 발전 연구는 기술 격차를 줄이고 경쟁력 있는 제품 개발에 필수적인 원천 연구임

○ 기존의 터빈형 발전수차는 고속의 유속에서는 효율이 높으나 저속에서는 그 효율이 급격히 나빠지는 단점이 있음. 이와 달리 진동식 조류발전은 저유속 조건에도 적용 가능하므로 부존량을 늘리는 효과

○ 생체 모사 기능을 활용한 진동식 터빈 발전기술 시장은 연구개발을 통한 선점이 가능한 블루오션임

제 2 절 파급효과

○ 이산화탄소 배출이 전무함으로써 탄소배출권 획득과 CDM 기술 수출이 가능하고, 일자리 창출과 저탄소 녹색성장을 지향하는 산업발전에도 큰 영향을 미침

○ 정부의 그린에너지 산업육성 목표인 2030년까지 신재생에너지 보급율 11% 이상 확대(기후변화대응 종합기본계획, 2008.09.19., 국무총리실 기후변화대책기획단)에 기여함으로써 산업발전 전반에 대한 파급효과가 매우 큼

○ 온실가스배출이 전혀 없는 생체 형상 진동식 발전기술은 기후변화에 대응하는 Green Technology로서 지속적 성장 동력이 됨

○ 진동식 발전장치의 실린더는 수중에 횡방향으로 설치되어 상하로 진동함으로써 육상의 풍력발전장치나 수중 터빈형 발전수차처럼 생물(새, 물고기)에 대한 위해성이 거의 없기 때문에 생물에 대한 친환경성에서도 월등한 강점을 가짐으로써 인간-자연의 충돌을 최소화함

제 2 장 국내외 기술개발 현황

○ 최근 터빈 방식 외에 자연에서 영감을 얻은 새로운 형태로, 자연모사 공학(biomimetic engineering)을 활용한 발전기가 개발되고 있음

○ 그림 2-1과 같이 영국의 Stingray와 PulseTidal이 대표적이며 주로 진동운동(Oscillation)을 통해 발전함.
- Stingray의 경우 Engineering Business사가 영국 DTI의 지원을 받아 2003년에 Shetland Islands에 설치가 됨

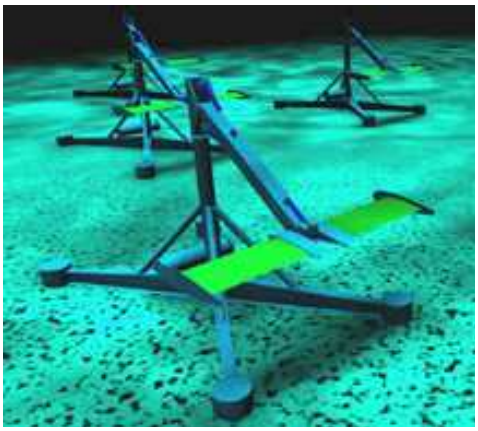


그림 2-1 Stringray 모식도와 설치전경

○ 상기 진동식 조류발전기는 비행기의 익형(airfoil)을 그대로 사용하고 피치(pitch) 제어를 통해 양력(lift)을 유발하는 시스템임
- 이 진동자형상은 비행 조건에 최적화된 형상이기 때문에, 조류발전에 적용 시에는 해양 환경에 적합하고 효율적인 형상개발 연구에 대한 필요성이 있음

○ 생체의 형상을 모사하여 바다 속 유영(swimming)의 효율 향상을 가져오는 연구는 활발히 진행되어 왔으며 대표적인 논문으로 Fish(2009)가 있음
- 그림 2-2(좌)의 혹등고래는 앞전이 주름진 지느러미를 가지고 있는데 이는 그림 2-2(우)와 같이 압력분포와 유동분리 형태를 크게 바꾸고 결과적으로 항력(drag)의 큰 증가 없이 양력을 향상하는 효과를 가져옴을 확인하였음
- 또한 가리비조개 껍질의 유동방향 주름에 의하여 훌륭한 유영 능력을 가지게 된다는 결과도 발표되었음 (Anderson 등, '97)
- 이와 같이 유영 성능 향상을 위해서는 생명체 형상 모사 시도는 있어 왔으나 조류 에너지 발전의 경우 생체 형상모사를 통한 성능향상에 대한 연구는 진행된 바 없음

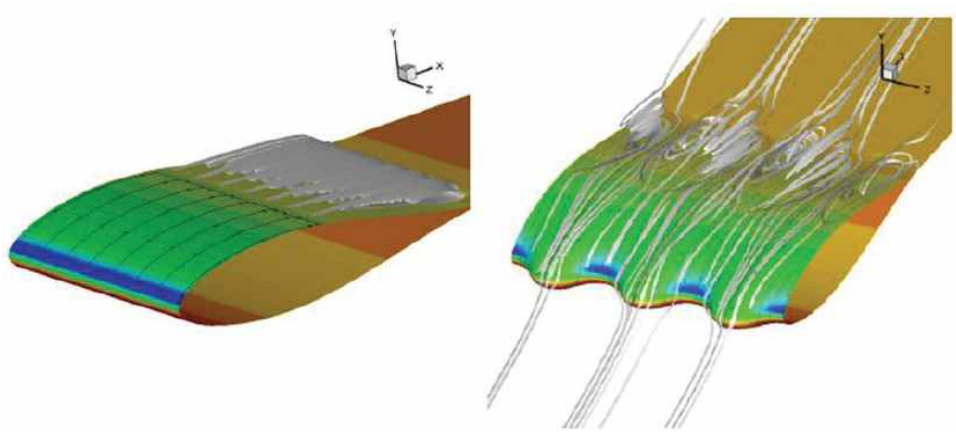


그림 2-2 혹등 고래 가슴지느러미의 주름(상) 주름유무에 의한 압력분포와 유동라인(하)

○ Full scale demonstration prototype tidal stream generator (Pulse stream 1200)

- 사업기간; 2009-11-01 ~ 2013-10-31
- 사업비: 13,940,000 유로(한화 약 200억)
- IT POWER사(영국), PULSE TIDAL사(영국) 등 유럽 7개의 회사가 참여
- 설치 및 발전에 대해 현재 일반에 공개된 사항은 없음

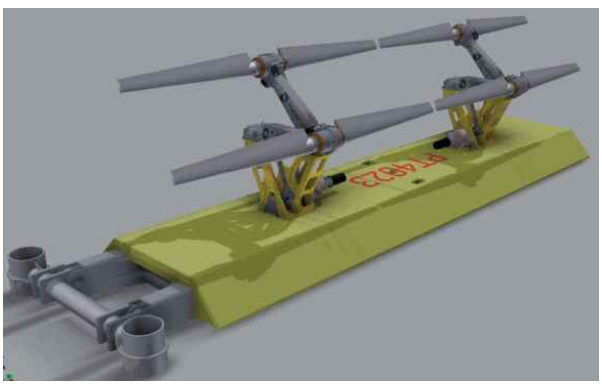


그림 2-3 다발식 진동식 터빈 형상(좌)과 설치 조감도(우)

○ 국내에서는 에너지기술평가원의 “고효율/친환경 조류발전을 위한 유연 플랩형 조류 터빈 기술 개발” 사업이 진행되고 있음

- 친환경적 시스템으로 해양생물과의 충돌 및 환경 변화 최소화를 기대할 수 있음
- 유연한 움직임으로 효율을 향상하는 시스템으로 강체 진동자 대체 가능함
- 차후 통합시스템이 개발되면 근접 배치가 가능하여 조류 유력지에 집약적으로 설치 가능함

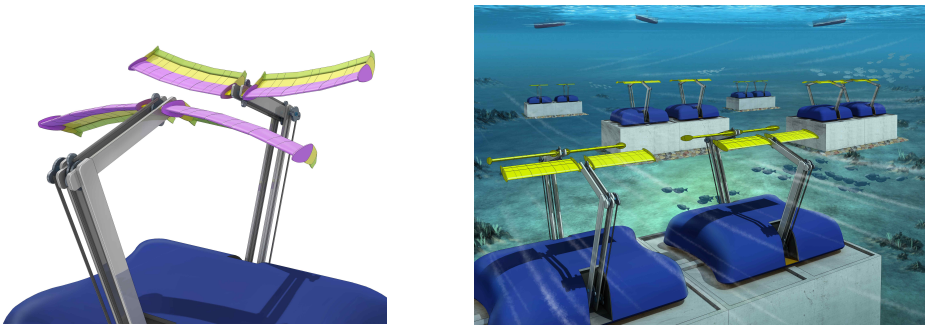


그림 2-4 유연플랩 조류시스템 개념도와 실해역 배치도

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 진동식 터빈 실험장치 개선

1. 진동식 조류 발전 원리

○ 그림 3-1(상)를 보면 구체형의 물체가 흐르는 물속에 있으면서 아래 위로 움직일 경우에는 칼만 보텍스가 구체의 뒤쪽으로 모여들면서 항력(drag)가 증가하는 형태가 됨. 이 때 발생되는 양력(lift)을 이용하여 발전이 가능하며 이 방식을 vortex induced vibration이라 함

○ 하지만 진동자형태의 물체가 피치(회전)각을 특정 주파수로 변화하면 이에 의해 아래 위로 움직이게 되며, 칼만 보텍스가 안쪽이 아니라 오히려 바깥쪽으로 빠지면서 추력이 발생함

- 수차를 통한 발전의 경우는 항력가 줄어듬으로 양력이 증가함
- 이는 능동 피치제어가 필요하므로 에너지 소모가 있으나, 이는 발전되는 에너지 양에 비해 상당히 적은 것으로 알려짐

○ 피치 제어를 활용하는 경우 조금 더 큰 토크를 얻을 수 있으며, 아래 위로의 운동을 회전형태로 바꾸어 발전기를 돌려 발전함

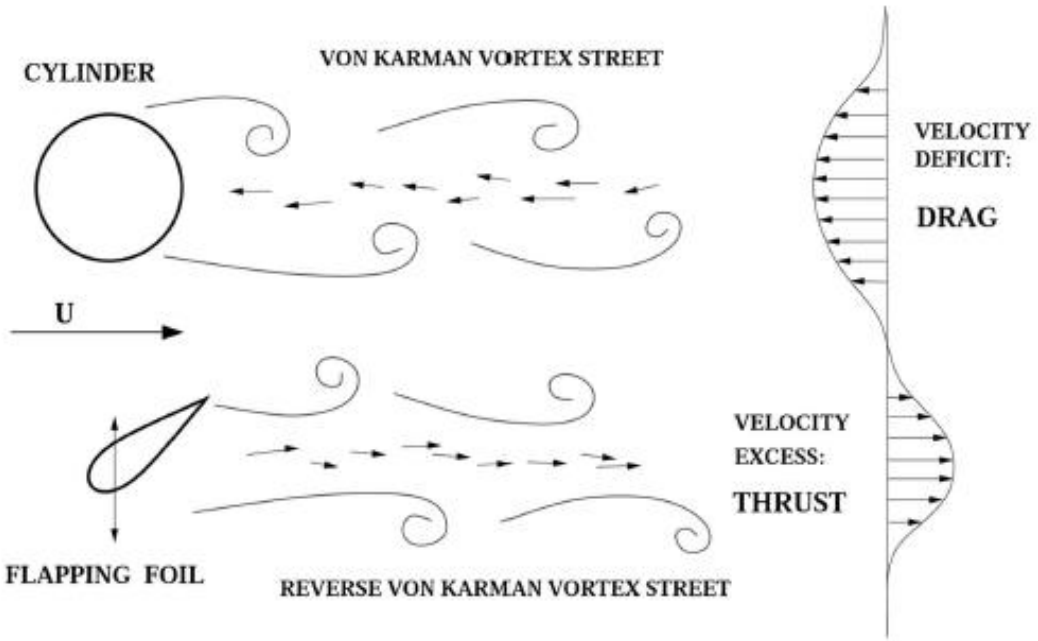


그림 3-1 진동식 조류 발전 원리

2. 개선된 동력전달 장치를 포함한 듀얼시스템 설계 및 제작

○ 시스템에는 진동 운동을 단방향 회전을 변환하는 장치, 진동자, 스윙 암, 프레임 등의 장치 관련 요소들과, 센서, 그리고 자료 처리 장치가 필요

○ 일방향 동력전달 장치 1차 설계 및 제작

- 한쪽 방향으로만 동력을 전달하는 일방향 클러치를 적용하여, 동력을 일방향으로만 전달
- 그림 3-2에서와 같이 구매 가능한 부품을 이용하고, 3차원 CAD를 적용하여 각 부품 설계 및 조립성 검토
- 부품들은 기존 제품을 주문하였고 CNC로 제단한 프레임에 조립함
- 최종 회전축에 엔코더를 결합하여 신호 습득할 수 있게 하였음

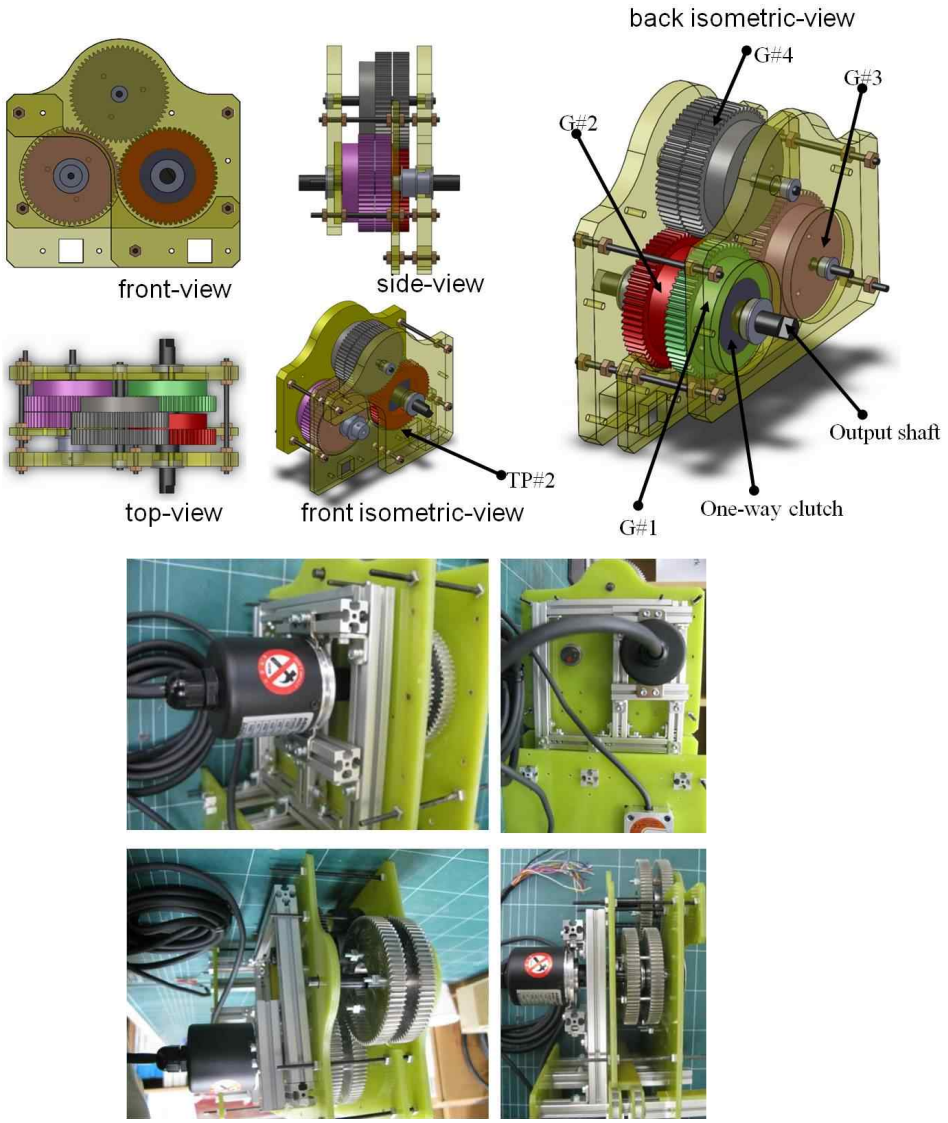


그림 3-2 일방향 동력전달장치의 3차원 CAD 설계 및 제작

○ 1차 제작품의 성능 실험 결과

- 유속 0.58 m/s 피치각 65도, 스텝 함수 적용
- 부하 0.8 Nm에서 상하 운동에 의한 통수 면적은 0.04m^2

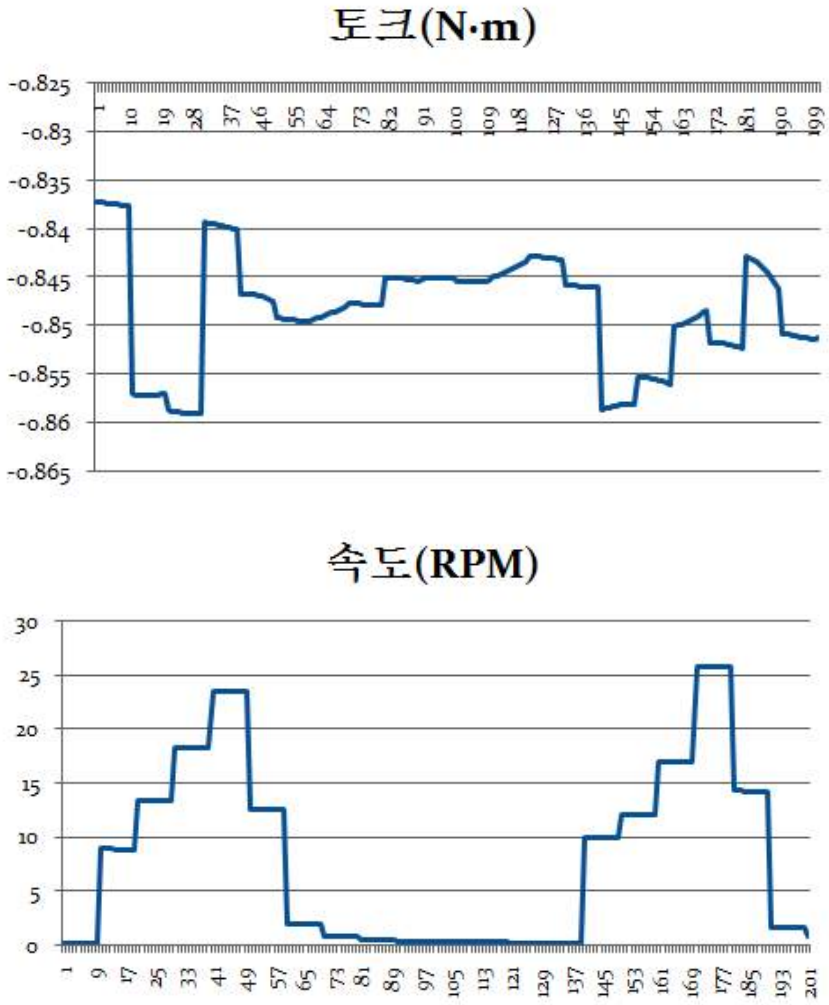


그림 3-3 진동식 조류발전 실험 시 토크와 속도 결과

- 속도의 변동성이 크게 나타남
- 유동에너지 대비 터빈 효율은 13.5%
- 효율 향상을 위한 장치 개선 노력이 요구됨

○ 기구 방식의 동력전달계 2차 설계 및 제작

- 1차 제작품 실험 결과 속도 변동성 및 효율이 낮게 나옴

· 이를 극복하기 위해 진동자 2개를 갖는 듀얼 시스템으로 개발하기로 함

- 기존 시스템은 주로 유압에 의한 동력전달계를 이용함

· 마찰열에 의한 에너지 소모가 있음

- 자동차 엔진과 유사한 기구 개발

· 각 진동자에서 전달되는 주기적 특성의 동력을 효율적으로 전달하기 위해서는 다기통 엔진과 유사한 방식의 동력전달기구임

· 그림 3-4는 개념도로서 2개의 부재가 이용되는 경우를 나타냄. 이 동력전달기구에서는 다기통엔진 안 피스톤의 피크-밸리 주기함수와 유사한 승강부재의 토크를 전달하기 위해 crank가 이용되고, 회전에너지를 안정적으로 전달해주기 위해 flywheel이 이용됨

· 그리고 각 승강부재는 위상차에 의해 동일 시간대의 속도가 다르므로, shaft가 최고 속도로 회전할 수 있도록 clutch가 사용됨. 녹색의 spur 기어 셋은 같은 방향의 회전력을 전달하기 위해 장착이 되었으며 flywheel을 통해 안정화된 최종 회전축에 검은색의 발전기가 연결됨

· Clutch에 의해 여러 개의 피크-밸리 주기의 동력이 전달되는 것은 팽이치기의 회전력 전달 메커니즘과 유사함

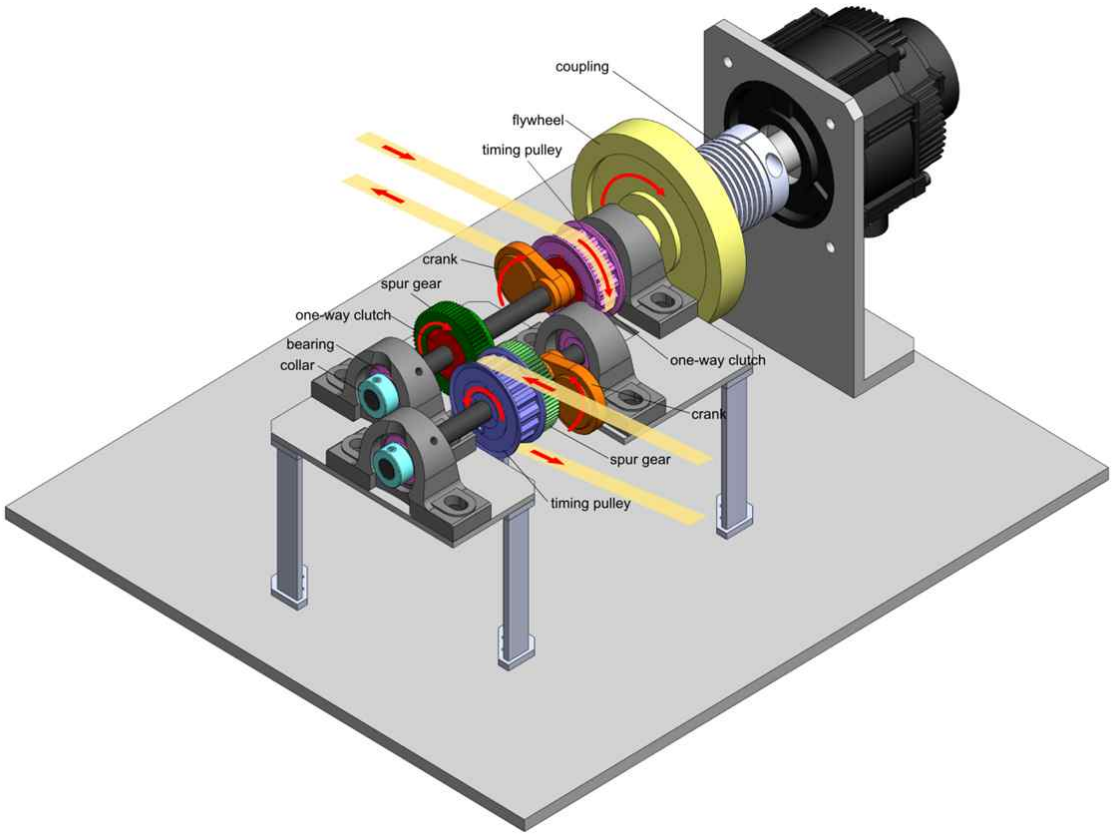


그림 3-4 듀얼 시스템의 동력전달장치

- 기존 단일 시스템과는 벨트 결합을 함
- 결합된 개념도는 그림 3-5와 같음

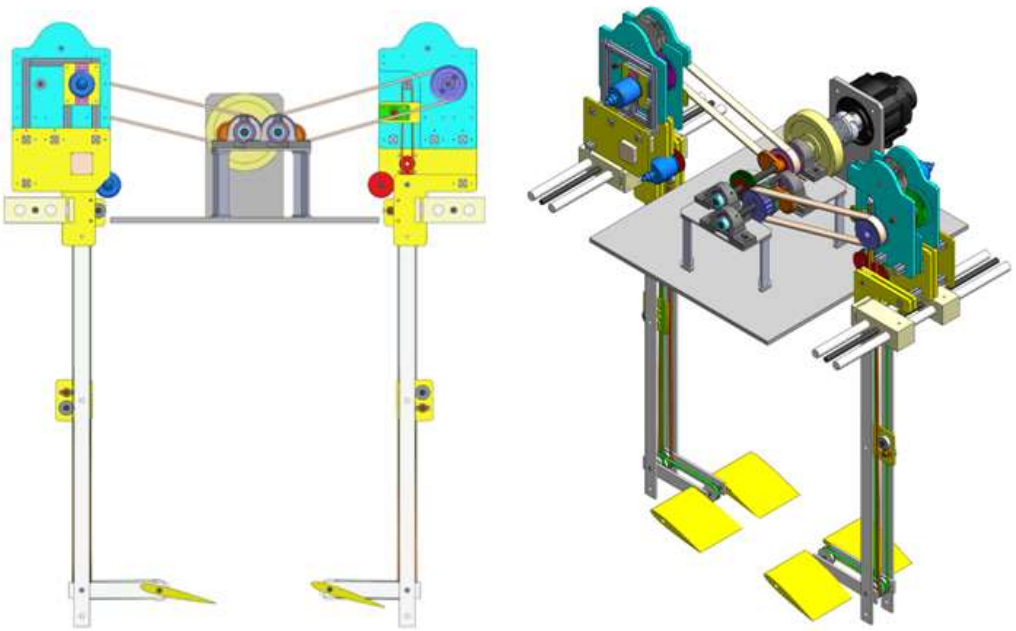


그림 3-5 듀얼 시스템의 측면도 및 사시도

- 동력전달계 제작 도면
  · 회전 속도를 증가하기 위해 벨트 풀리 비를 4:1로 제작하여 RPM을 증가함

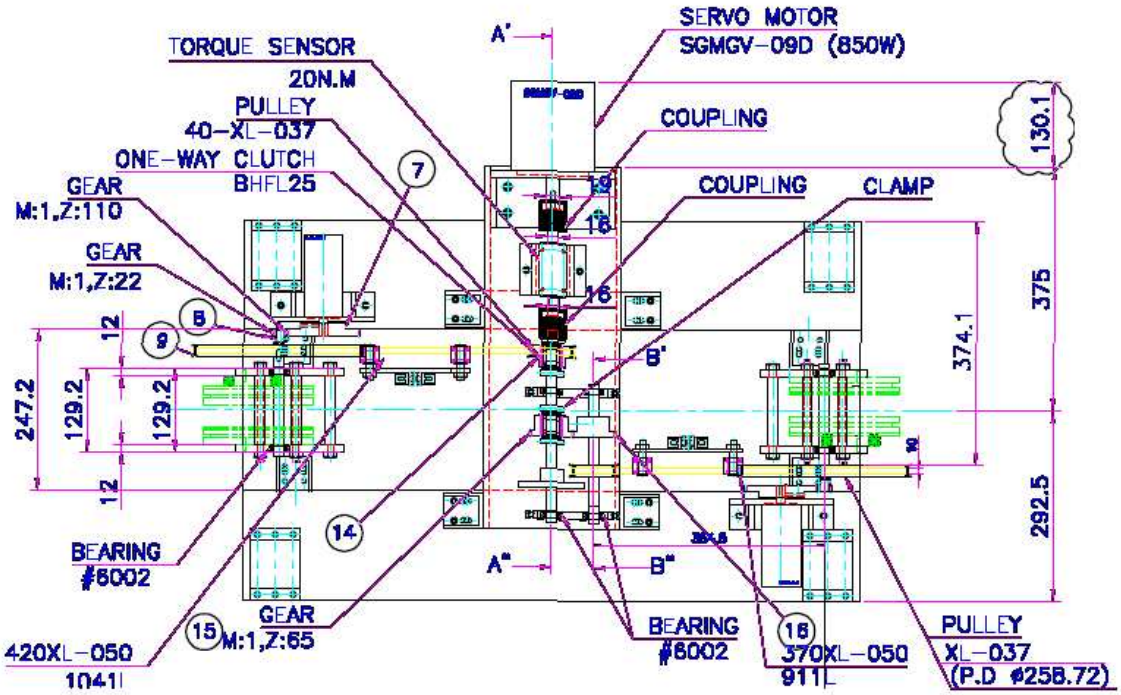


그림 3-6 듀얼 동력전달계 제작 도면

- 듀얼 시스템 조립도 CAD화 및 제작
  · CAD와 실제 제작품과 다른 점은 무게 추 부분임
  · 축소모형이라, 진동자의 중성부력을 맞추지 못하였고, 아래로 처짐을 막기 위해 추를 이용함

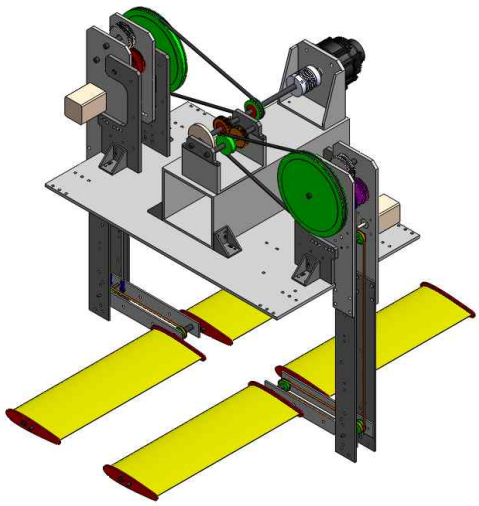


그림 3-7 듀얼시스템의 설계도(좌)와 제작된 형상(우)

3. 예인수조 실험을 통한 유의한 설계 변수 도출

○ 예인수조 실내실험

- 실험 목적: 실내실험 진행을 통한 최종 시스템 설계 타당성 제고
- 수조 규격: 너비 8m, 깊이 3.5m, 총 길이 110m
- 유속 및 작동 범위: 최대유속 3.5m/s까지 가능함
  · 레이놀즈 수와 프라우드 상사를 고려해서 0.6-0.9m/s에서 실험 진행함
- 실험 범위
  · 3차원 효과가 포함된 듀얼 시스템 발전 실험
  · 생체 형상 진동 효과 실험
- 실험모형 규격
  · 강체 진동자: 200mm 단면길이, 600mm 1/2 진동자길이, 암길이 300mm

그림 3-8 예인수조의 실험 모형 및 설치 전경

○ 매개변수 변화 영향 및 에너지 추출효율 분석 연구

- 배치조건인 위상각과 간격 효과는 1차 진동식 시스템을 두 개를 제작하고 해양과학기술원 수조에서 실험을 수행하였고, 최적 조건을 도출하였음
  · 위상각의 경우 90도가 -90도나 180도보다 제어 용이성과 효율에서 장점을 보임. 90도 근처의 세밀한 분석은 추후 진행할 예정임
  · 간격의 경우 단면 길이의 1배의 경우가 제어 용이성과 효율에서 장점을 보임. 1배 간격 근처의 세밀한 분석은 추후 진행할 예정
  · 이 조건을 이용하여 예인수조 실험을 진행하였음

- 암각 효과
  · 유속 0.6 m/s, 암각을 20, 30, 및 40도로 고정하고 PID 피치제어를 이용함
  · 주파수를 0.2 Hz로 고정하고 토크를 0.5, 0.75, 및 1.0 N·m에 대한 효율을 계산

함

· 암각의 상승과 하강 절대차가 5도 범위 내에서 데이터 획득

표 3-1 암각 변경에 대한 효율 결과

입력 암각 (도)	실제 진동자 1 암각 (도)		실제 진동자 2 암각 (도)		부하 (N·m)	앞 효율 (%)	뒷 효율 (%)	전체 효율 (%)
	상승	하강	상승	하강				
20	24	21	21	22	0.5	3.2	3.3	6.5
	22	23	22.5	21	0.75	4.7	4.9	9.6
	22	21	21	22.5	1	6.6	6.4	13.0
30	30	31	31	28.5	0.5	3.3	3.7	7.0
	29	31	28.5	28.5	0.75	4.6	5.2	9.9
	29	28	28	27.5	1	6.1	6.8	12.9
40	42	43	40.5	41	0.5	3.3	3.8	7.1
	42	43	40	39.5	0.75	4.9	5.6	10.5
	40	43	39	39	1	6.3	7.2	13.5

· 부하가 증가될 때, 같은 암각 조건 하에서 효율은 일정하게 상승됨

· 같은 부하 조건 하에서 대체로 높은 암각일수록 효율이 증대됨. 하지만 값의 차이는 그리 크지는 않음

- 주파수 효과

· 유속 0.6m/s에서 부하를 1.5 N·m로 고정하고 진행

표 3-2 암각과 주파수 변경에 따른 발전량과 효율

입력 암각 (도)	주파수 (Hz)	실제 날개 1 암각 (도)		실제 날개 2 암각 (도)		부하 (N · m)	Power (W)	효율 (%)	앞날개 효율 (%)	뒷날개 효율 (%)
		상승	하강	상승	하강					
20	0.2	22	23	22.5	22.5	1.5	2.54	**16.20**	8.14	8.06
20	**0.3**	**22**	**21**	**20.5**	**20**	**1.5**	**3.97**	**26.38**	12.75	13.63
20	0.4	12	11	11	11.5	1.5	2.83	**38.10**	19.23	18.86
20	0.5	7	6	5.5	6	1.5	1.9	**47.64**	23.48	24.16
30	0.2	27	26	25	26	1.5	2.91	**16.39**	7.96	8.43
30	**0.3**	**20**	**21**	**20.5**	**19.5**	**1.5**	**4.07**	**27.23**	13.48	13.75
30	0.4	10	11	11	10.5	1.5	2.9	**35.23**	17.20	18.03
30	0.5	6	7	5.5	5.5	1.5	1.88	**46.06**	23.11	22.95
40	0.2	39	38	37.5	37.5	1.5	4.34	**17.22**	8.43	8.79
40	**0.3**	**24**	**25**	**22.5**	**22**	**1.5**	**4.58**	**27.37**	13.05	14.32
40	0.4	12	11	11	10.5	1.5	2.85	**35.76**	17.45	18.30
40	0.5	5	6	5.5	5	1.5	1.83	**45.56**	22.86	22.70

· 효율 관점에서는 고주파일수록 유리함

· 출력 생성 관점에서는 입력 암각이 20, 30도일 경우 0.3 Hz 일 경우 최대임

· 반면 입력 암각이 40도 인 경우 0.25 Hz 일 경우 최대이며 주파수 변경에 따른

발전량 추이는 그림 3-9에서 확인할 수 있음

· 이는 암각이 높을수록 진동자의 pitch가 회전할 수 있는 시간이 충분히 요구되므로, 낮은 주파수 영역에서 생성되는 출력이 높아짐

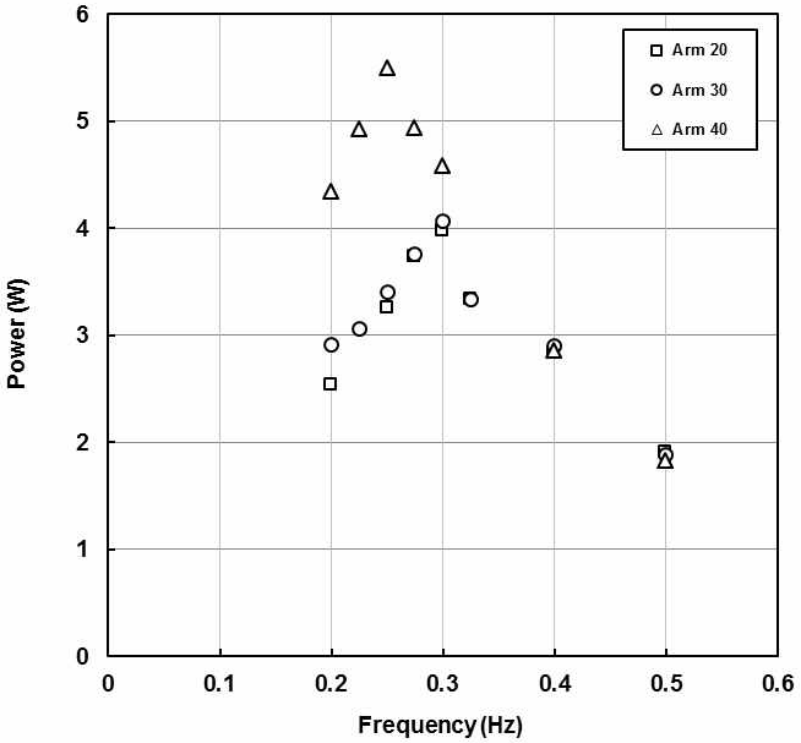


그림 3-9 다양한 암각 조건에서 주파수에 따른 발전량

○ 근접 발전 가능성과 변동성 향상

- 표 3-1과 3-2의 결과를 보게 되면, 코드 길이 간격으로 근접되어 배치되었음에도 불구하고 효율차이가 크지 않으며, 일부는 뒤쪽 효율이 더 우수함

· 이는 앞쪽 시스템에서 생성된 후류가 뒤쪽 시스템에 긍정적인 영향을 가져온다는 증거임

· 이를 검증하기 위해서는 유동 가시화나 유동 해석이 뒷받침 되어야 하나 본 연구의 기간과 금액이 한정된 이유로 차후에 진행하기로 함

- 듀얼 동력전달계의 변동성

· 그림 3-10의 결과를 보면 토크와 RPM 변동성이 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있음

· 이는 FLYWHEEL의 역할과 90도 위상차에 의한 전달에 기인하며 최적인 FLYWHEEL 설계를 하게 된다면 더 나은 결과를 얻을 수 있음

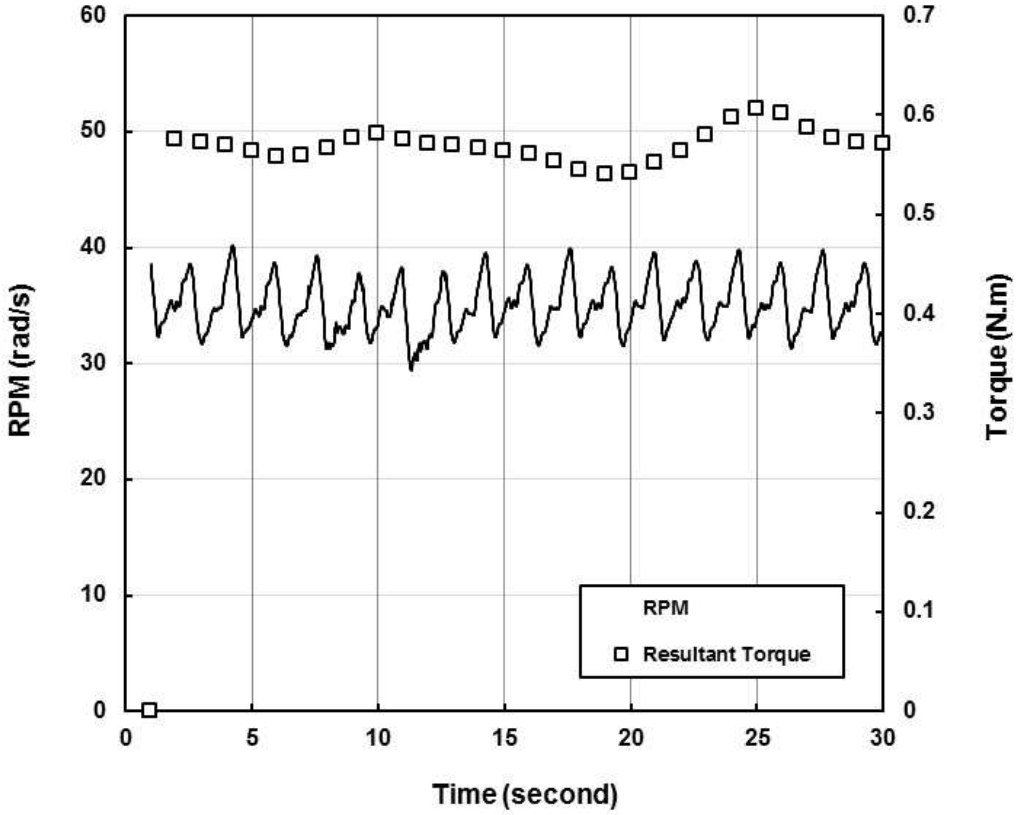


그림 3-10 듀얼 동력전달계에 의한 RPM과 토크 시간 이력곡선

○ 에너지 추출효율에 따른 매개변수의 유의도 분석

· 주파수도 클수록 효율 면에서는 장점이 있으나, 원하는 이동거리 및 제어 용이성을 고려하여 최대 주파수를 설정할 필요가 있음. 또한 발전량에서 최적인 주파수는 파라미터 해석을 통해서 예측되며, 두 가지 측면을 고려해서 결정할 필요가 있음

· 암각이 큰 경우가 대체로 효율 향상 효과가 있으나 값의 차이는 그리 크지는 않음.

· 따라서 유의한 매개변수는 주파수, 암각 등 최적 조건을 도출하기 위해서는 설계도구가 필요함

4. 예측 모델 개발/검증

○ 예측 모델

- 운동 방정식

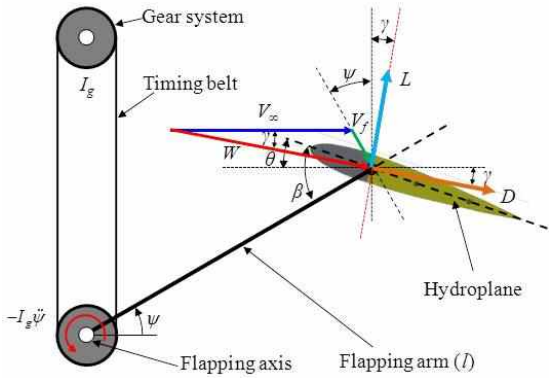


그림 3-11 플래핑 암과 진동자에 작용하는 힘 분석도

· 본 시스템에서는 유속 V_∞의 유입류가 진동자에 작용하여 힘을 발생하여, 피치 각도의 변화에 따라서 진동자와 플래핑 암을 상하 방향으로 운동하게 하고, 이 플래핑 운동은 기어, 벨트, 풀리 등을 움직이게 함. 플래핑 암의 위치를 ψ, 진동자의 피치각을 θ라고 하면, 진동자에 작용하는 힘은 그림 3-11과 같이 표시됨

· 기어 시스템의 운동 방정식은 아래와 같이 표현할 수 있음

$$M_g = I_g\ddot{\psi},$$

여기서, M_g는 기어 시스템에 작용하는 모멘트로서 플래핑 암-진동자 시스템으로부터 작용하는 외부 모멘트로 생각할 수 있고, I_g는 기어 시스템의 질량 관성 모멘트임

· 진동자에 작용하는 유입류는 플래핑 암의 회전 운동으로 인한 진동자의 상하 운동으로, 진동자에 대하여 아래와 같은 상대 속도를 가짐

$$W = \sqrt{(V_\infty + l\dot{\psi}sin\psi)^2 + l^2\dot{\psi}^2cos^2\psi}$$

여기서 l과 $\dot{\psi}$은 각각 플랩 암의 길이와 각속도임.

· 이 유입류의 속도로 인하여 진동자가 발생하는 양력과 항력은 아래의 수식으로 표현됨

$$L = \frac{1}{2}\rho C_L S[(V_\infty + l\dot{\psi}sin\psi)^2 + l^2\dot{\psi}^2cos^2\psi],$$

$$D = \frac{1}{2}\rho C_D S[(V_\infty + l\dot{\psi}sin\psi)^2 + l^2\dot{\psi}^2cos^2\psi],$$

여기서, ρ, C_L, C_D, S는 각각 물의 밀도, 양력계수, 항력계수, 진동자의 면적임

· 양력과 항력에 의하여 발생하는 플랩 축에 대한 모멘트 (M_h)는 아래 수식으로 표현됨

$$M_h = (Lcos\gamma + Dsin\gamma)lcos\psi + (Lsin\gamma - Dcos\gamma)lsin\psi.$$

여기서 γ는 위의 그림에서와 같이 유입류의 굴절 각도임

· 위의 그림으로부터, 진동자의 운동 방정식은 아래와 같음

$$I\ddot{\psi} = M_h - I_g\ddot{\psi} - c\dot{\psi},$$

여기서 I 는 진동자와 플랩 암의 질량 관성 모멘트, c는 변환기어 시스템의 감쇄 상수임

· 그런데, 실험 중에는 출력을 측정하기 위하여, 최종 출력단 축에서 토크를 인가함

· 기계적 부하(load)인 인가토크 (holding torque, M_a)로 인하여, 위의 운동 방정식은 아래와 같이 수정됨

$$I\ddot{\psi} = M_h - I_g\ddot{\psi} - c\dot{\psi} - sign(\dot{\psi})M_a,$$

여기서,

$$sign(\dot{\psi}) = \begin{cases} +1 \text{ if } \dot{\psi} \geq 0 \\ -1 \text{ if } \dot{\psi} < 0 \end{cases}$$

· 이를 통해 다음의 진동자 운동 방정식을 얻을 수 있는데, 비선형 방정식이므로 Runge-Kutta 방법으로 풀어야 함

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} = {} & c_1\sqrt{(V_\infty + l\dot{\psi}sin\psi)^2 + l^2\dot{\psi}^2cos^2\psi} \times \\ & \times \left\{ \left[C_L(V_\infty + l\dot{\psi}sin\psi) - C_D l\dot{\psi}cos\psi \right]\cos\psi - \left[C_L l\dot{\psi}cos\psi + C_D(V_\infty + l\dot{\psi}sin\psi) \right]\sin\psi \right\} \\ & - c_2\dot{\psi} - c_3 sign(\dot{\psi}), \end{aligned}$$

여기서 플래핑 암의 길이는 0.185m, 실험에 적용한 유입류 속도는 0.58 m/s, 진동자의 무게 및 등가 질량 관성 모멘트는 아래의 표에 정리함

표 3-3 시스템의 특성

Parameters	Measured weight (kg)	Equivalent moment of inertial around the flapping axis (kg.m^2)
Hydroplane + Flapping arm (I)	0.463	0.0179
Gear and pulley system (I_g)	-	0.0053

위 수식에서 계수 c_1, c_2, c_3 는 아래와 같음

$$c_1 = \frac{\rho lS}{2(I + I_g)},\ c_2 = \frac{c}{I + I_g},\ c_3 = \frac{Ma}{I + I_g}$$

- Reynolds number

· 진동자가 발생하는 양력과 항력은 아래와 같이 정의되는 레이놀즈 수 (Reynolds

number)에 따라 달라지므로, 설계된 시스템의 레이놀즈 수를 먼저 계산함

$$Re = \frac{V_\infty C}{\upsilon},$$

여기서, 진동자의 코드 C=0.15m, 물의 동적 점성도 (kinematic viscosity) υ =8.9356E-7m^2/s [2]이고, 실험에서 적용된 유입류의 속도 V_∞는 0.58m/s이므로, 레이놀즈 수는 9.7x10^4 임

- 양력 및 항력 계수
  · 앞서 계산한 레이놀즈 수 영역에서의 NACA0012 양력 및 항력 계수의 자료는 참고문헌 [3]에서 아래 그림과 같이 얻을 수 있는데, 여기서 AOA는 받음각 (anlge of attack)의 약어임

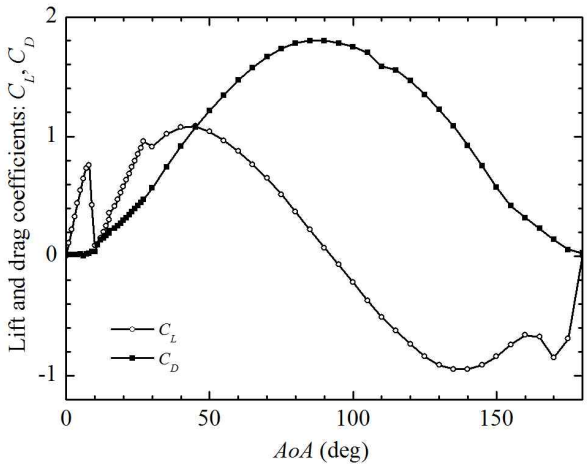


그림 3-12 NACA0012의 양력 및 항력 계수

- 인가토크가 있는 경우 실험결과와 비교

<u>피치 각도</u>

· 시스템의 출력단 축에 0.2N·m의 토크를 인가한 경우, 진동자의 피치 각도와 동적 응답을 비디오 영상으로 촬영하고, 영상자료에 direct linear transformation method를 적용하여, 진동자의 피치 각도 자료를 아래 그림과 같이 추출함

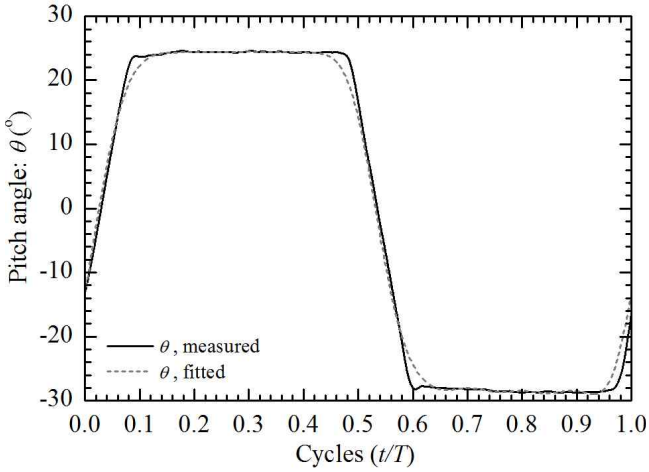


그림 3-13 측정된 피치 각도의 시간 이력곡선 (인가토크=0.2 Nm)

<u>동적 응답</u>

· 그림 3-13에서와 같이, 측정된 피치 각도를 수식으로 근사하여 피치 각도의 시간 이력을 함수로 표현한 후, 운동 방정식을 수치적으로 풀어서, 그림 3-14와 같은 동적 응답을 얻음

· 인가토크가 있는 경우, 측정한 응답과 예측한 응답에 약간의 오차가 발생하나, 예측 응답 특성은 측정된 응답 특성을 대체적으로 잘 재현하는 것으로 판단됨.

· 아래 식으로 통해 계산된 오차는 38.5%로 정확도는 61.5%이며, 정확도를 향상하는 연구를 진행할 예정임

$$\epsilon = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T |\psi_m(t) - \psi_e(t)| dt}{\frac{1}{T}\int_0^T |\psi_m(t)| dt},$$

여기서 ψ_m, ψ_e, T 는 측정된 암각, 예측된 값 그리고 플랩 주기임

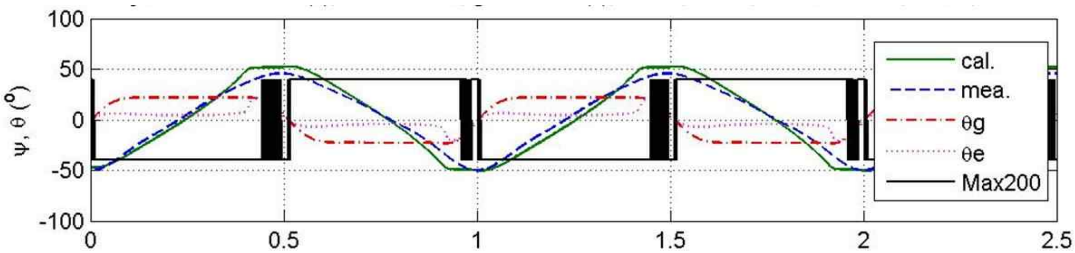
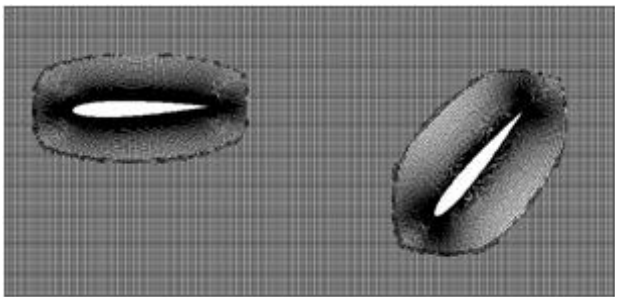


그림 3-14 예측 응답과 측정 응답의 비교 (인가토크=0.2 N·m)

○ 유동해석

- 내부도구와 Chimera mesh이용
- 코드길이 2m, 진동자간 거리 3m로 1.5배 간격을 사용함



3-15 듀얼 시스템의 Chimera mesh를 이용한 격자시스템

- 유동속도 2m/s, 무차원 주파수 0.15, 상하운동 0.5m, 피치각 50도, 위상차는 90도임
- 앞진동자(FA) 뒷진동자(RA)조합과 단일진동자(SA) 비교
  · FA와 SA 출력 곡선은 유사함
  · RA의 출력 곡선은 FA에 비해 90도 정도의 위상차
  · SA의 효율을 27%
  · FA과 RA 효율은 각각 24%와 17%로 합계는 41%

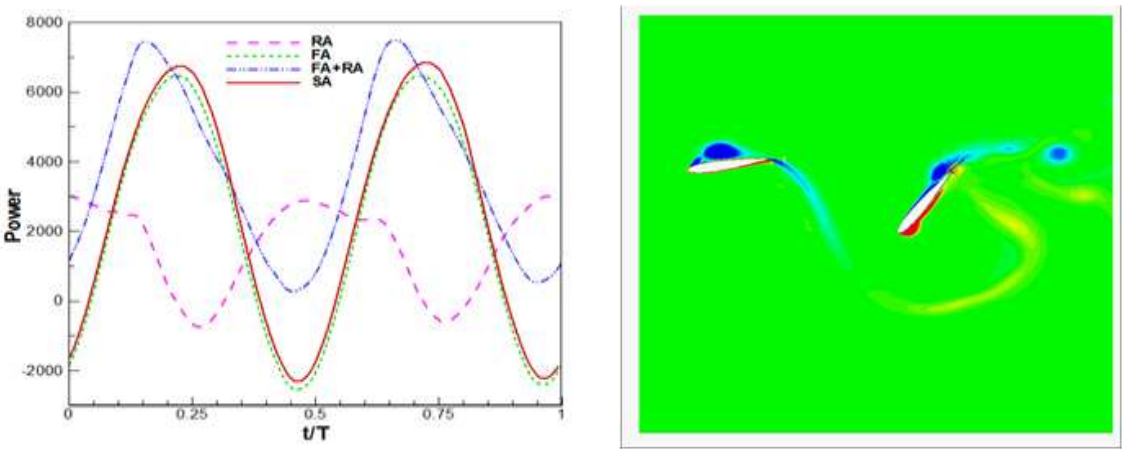


그림 3-16 듀얼 시스템의 출력 곡선과 와류 분포도

제 2 절 생체 형상 진동식 터빈 심화 연구

1. 타깃 해양 동물

○ 해양 동물 중 유동 에너지를 활용하는 가리비 조개를 모사하고자 함. 가리비 조개의 경우 clapping motion(박수치는 모양)으로 바닥에서 부상하며, 그 이후에는 유동 에너지를 이용하여 이동함

○ 가리비 종 중에서 그림과 같이 *Chalamys Nobilis*in을 선택함. 이 종의 특성은 껍데기의 형상이 대칭이고 곡면 정도도 같으며, 매우 주름져 있으며, 두께가 얇음

○ Pennington(1984)의 연구에서 측정된 두께 0.7mm, 깊이/길이 비 0.16, 주름 크기 1.0mm, 그리고 주름 간격 5.1mm 등이 기본 값으로 이용됨

○ 살아있는 가리비조개는 빠르게 껍데기를 열었다 닫았다 (clapping) 하면서 수영을 함. 이 움직임은 포식자로부터 도망가기 위한 목적과 음식과 짝을 찾기 위한 목적을 가지고 있음 또한 먹을 것이 풍부하고, 번식을 위한 새로운 장소로 이동하기 위한 목적도 있음

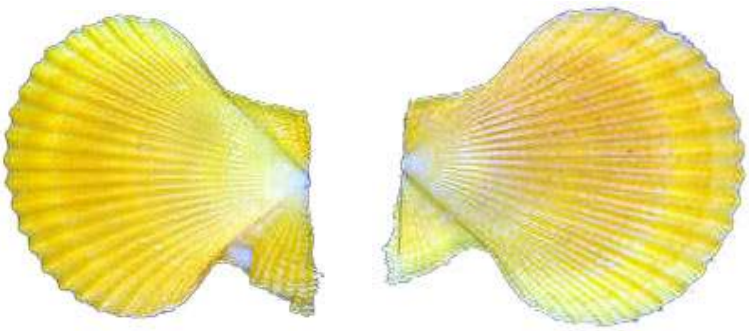


그림 3-17 양 밸브를 가지는 노란색 *ChalamysNobilis*

○ 가리비조개의 수영 궤적은 크게 능동 수영, 수동 이동 상태로 나눌 수 있음. 능동 수영 상태는 주변 흐름이 있는 물길로 빠르게 상승하여 수평 비행을 하는 것임. 수동 이동 상태는 흐름을 받아 위 아래로 움직이는 상태임

○ 타깃 종을 포함한 작은 크기의 가리비 조개는 수직으로 수영하고, 짧은 기간 수평 비행을 하며, 충분한 이동거리를 얻기 위해 흐름을 최대한 이용하는 것으로 알려져 있음 (Minchin, 1992)

○ 이러한 작은 사이즈의 가리비 조개의 총 이동 거리는 전적으로 주변 유동 속도에 비례하는 결과를 보임 (Carsen, 1996)

○ 수영하는 동안 가리비 조개는 그들의 근육을 통해 능동적으로 회전하거나, 주변 유동에 의해 수동적으로 회전함

○ 주름선이 유동 방향과 맞게 있는 경우, 수영의 효율은 항력이 줄어듬에 의해 더 높아짐 (Anderson, 1997). 수동이동상태의 경우, 주름선이 유동과 수직으로 있게 되면 유동에 의해 이동 거리가 늘어나게 됨

○ 따라서 본 연구에서는 주름선이 유동방향과 수직으로 있는 경우에 대해 발전 능력을 해석하고자 함

2. 수치 해석 및 최적화

○ 가리비 조개의 형상학적인 요인이 진동식 조류발전기의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 수치 실험을 수행하고자함

○ 주름과 곡면(chamber)의 영향 분석을 위해, 타깃 종의 실제 주름 크기와, 깊이/길이비를 2배와 1/2배로 조절하고 다른 형상 요인은 고정함

○ 진동 크기와 주파수의 곱은 0.4가 이용되었으며, 이 수에서는 추진력이 작용하는 것으로 알려짐(Lai, 1999)

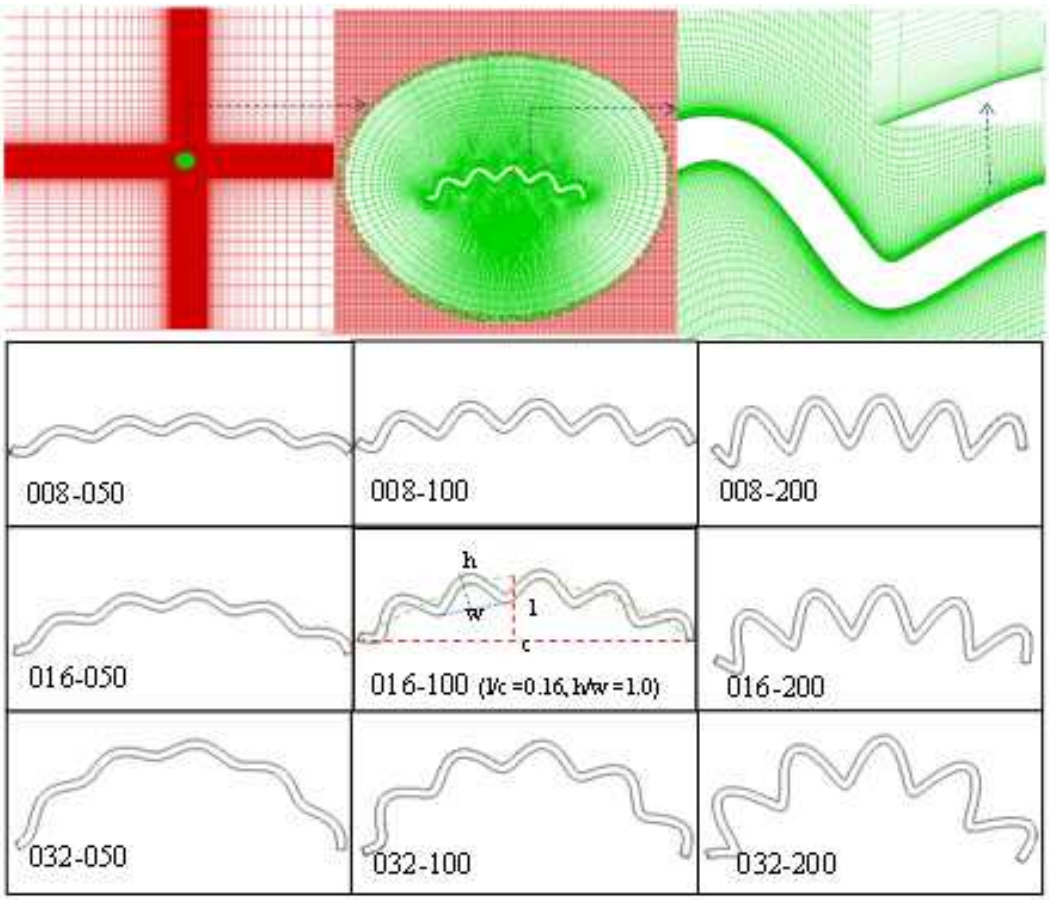


그림 3-18 격자 시스템와 후보군

○ 격자 시스템은 그림 3-18과 같이 바탕 메쉬와 물체에 부착된 메쉬로 구분됨

○ 원 형상에서는 바탕 메쉬는 200x200이며, 물체 부착 메쉬는 300x20임.

○ 2차원 나비어-스토스 시뮬레이션이 주어진 격자 시스템에 대해서 적용됨. 주름 크기는 세 개, 깊이/길이 비도 세 개로 주어져서 모두 9개의 경우에 대해 시뮬레

이션이 진행됨

○ 가리비 모형은 먼저 시간의 함수로 상하운동을 함

$$h(t) = h_0 \sin(\omega t^*),\ \ \theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t^* + \psi) \quad ,$$

여기서 h 는 순간적인 상하운동 값이며, h_0 는 무차원 상하운동의 크기이며, ω 는 무차원 주파수임. θ 는 회전(pitch) 각이며, θ_0 는 무차원 회전각 크기이며 ψ 는 위상각임. t^* 는 무차원 시간임

○ 상하운동과 회전의 조화 운동에 의해 다음과 같은 받음각(angle of attack)이 생성됨

$$\alpha(t) = \theta(t) - \arctan\left(\frac{c \cdot \dot{h}(t)}{U_0}\right) = \theta_0 \sin(\omega t^* + \psi) - \arctan\left(\frac{c \cdot h_0 \omega \cos(\omega t^*)}{U_0}\right) \quad ,$$

여기서 c는 코드길이이며 U_0 는 유동 속도임

○ 이런 상하운동과 회전운동을 하는 익형은 그림 3-19에 있으며 이때 출력 계수인 C_p 는 다음과 같이 정의됨

$$C_p = C_T \dot{h} + C_m \dot{\theta} \ \text{ with } \ C_T = F_T / (q_0 c),\ C_m = M / (q_0 c^2),\ q_0 = 1/2 \rho_0 U_0^{\ 2} \quad ,$$

여기서 F_T 는 상승력이고, M 은 모멘트, ρ_0 는 유동의 밀도임(Jones, 1997)

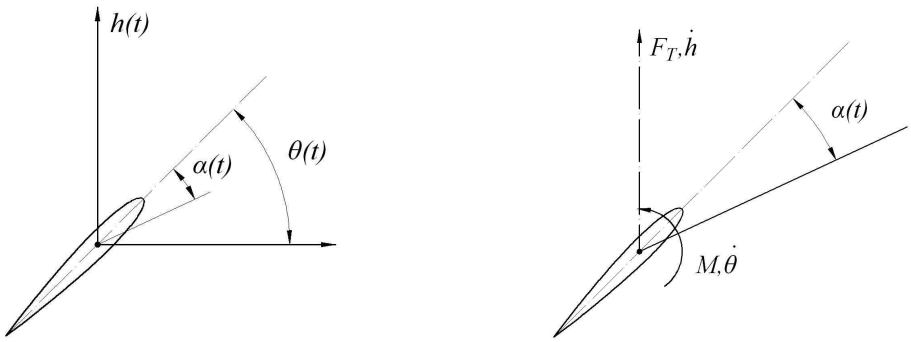


그림 3-19 유동에서 상하운동 및 회전운동(좌) 결과적인 힘과 속도(우)

○ 수치 실험은 수중이라는 환경에서 다음과 조건으로 진행됨

Re=13800, U_0 =1m/s, $\omega = 0.838$, c=0.1m, $\theta_0 = 0.75(43^\circ)$, $\psi = \pi/2$, h_0=0.75

이로 인해 스트로우홀 수 $st \approx 0.2$ 와 최대 받음각 $\alpha_{\max} \approx 0.69(39.4^\circ)$ 를 얻음

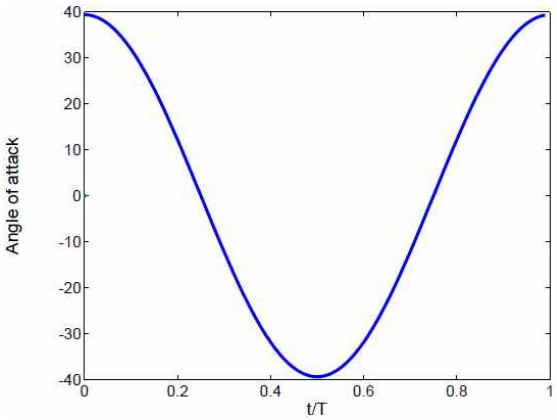


그림 3-20 주어진 조건에서 한 주기의 받음각

○ 그림 3-20과 같이 받음각이 조화 함수로 변화함으로, 주파수 증가에 의해 강하게 나타나는 비논리적인 와류의 형성은 없음 (Simpson, 2009)

○ 원 형상의 4번째 주기 출력 계수는 그림에 나타남. 여기서 상하운동과 회전운동 요소로 분리함

- 첫 번째 반주기의 결과는 형상의 비대칭성에 의해 두 번째 반주기와는 다르게 나타남
- 상하운동 요소가 주요하게 전체 출력계수에 영향을 미침. 4.75와 4.85사이의 음성 출력의 경우는 상하 운동 속도와 힘의 방향의 반대가 되어서 발생됨
- 회전 모멘트는 회전속도와는 다른 위상을 가지고 있음. 첫 번째와 세 번째 쿼터에서 음수가 나옴
- 그림 3-21에서 양수는 발전기에 의해 생성되는 출력을 의미하고, 음수는 시스템이 필요로 하는 출력에 해당됨

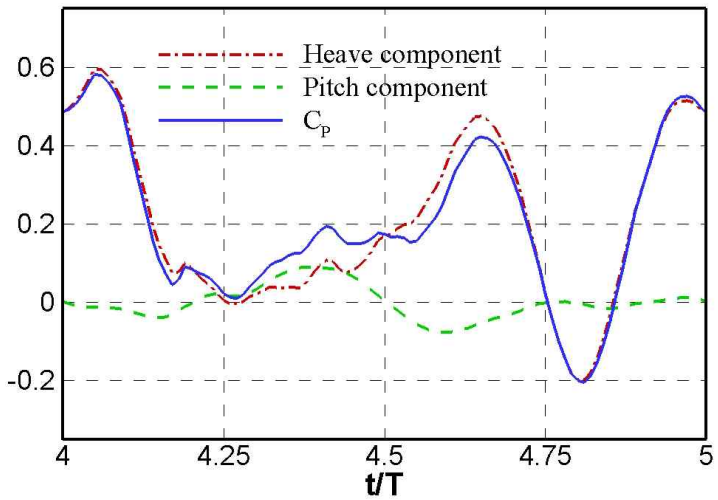


그림 3-21 상하운동 및 회전운동에 해당되는 출력계수 결과

○ 기존 단면형상과 생체형상 진동자

- 그림 3-22와 같이 상하면 앞전 와류 생성 양상이 다름
- 생성 시기, 크기, 위치 등의 차이가 압력 분포의 차이를 가져옴

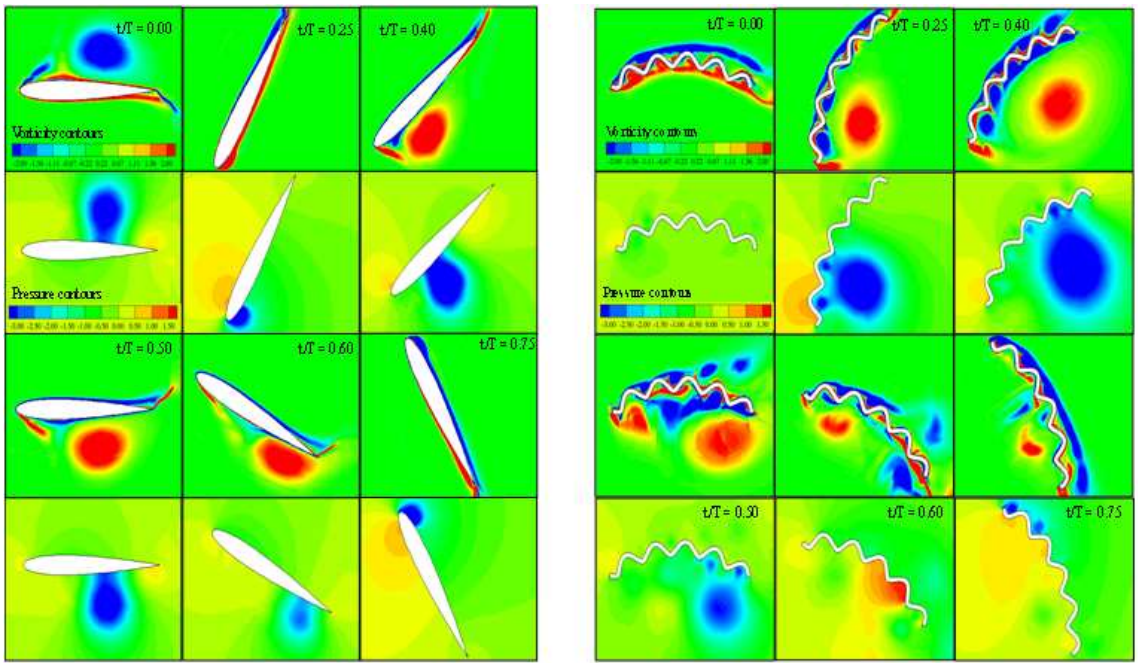


그림 3-22 기존 단면과 가리비 형상 단면의 경우 압력과 와류분포

○ 최적 운전 조건을 구하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하나, 여기서는 주어진 운전 조건에 대해 형상학적 요인이 어떻게 영향을 미치는지 연구함

○ 9가지 경우에 대해 전체 출력계수 평균과 각 요소의 평균을 표 3-4에 나열함.

- 여기서, 주름 크기와 깊이/길이비는 주름과 곡면 특성을 나타내는 특성치로 이용됨
- 평균값의 경우 최적인 008-100의 경우 기존 형상(NACA0012)에 비해 7%정도 높음
  · 하강 시의 최적인 008-200의 경우 17% 향상됨(하강의 경우가 상승의 경우보다 효율이 높음)

표 3-4 9가지 경우에 대한 요소별과 총 평균 출력계수

Case	Model	Downstroke	Upstroke	Full stroke
1	NACA0012	0.302	0.302	0.302
2	008-050	0.323	0.278	0.3
3	008-100	0.347	0.295	**0.321**
4	008-200	**0.352**	0.254	0.303
5	016-050	0.293	0.328	0.31
6	016-100	0.328	0.298	0.313
7	016-200	0.331	0.276	0.304
8	032-050	0.295	0.267	0.281
9	032-100	0.346	0.281	0.313
10	032-200	0.345	0.273	0.309

3 생체 형상 진동자 설계, 제작 실험

○ 개념 설계
- 상하강시 효율에 유리한 곡면을 유동에너지에 의해 가변적으로 형성
- 이를 통한 추가 효율 향상이 가능
- 주름진 곡면에 의해 구조적 보강이 가능하고 각도제한을 통해 매우 간단한 방식으로 곡면 형성

그림 3-23 생체형상 진동자 개념도

○ 진동자 제작 및 듀얼 시스템 결합
- 양쪽을 두 개의 판형으로 구성
- 각 판형과 중심축과의 결합은 탄성힌지를 이용하여 회복력을 활용하여 형상을 변경하도록 함
- 각도 제한자는 진동자 양 끝에 달려 있으며 충격 완화를 위해 댐퍼가 달릴 수 있으나, 본 모형은 축소된 이유로 공간제약에 의해 생략하였음
- 제작된 형상과 플랩 암에 설치된 전경은 그림 3-24에 있음

그림 3-24 생체형상 진동자 제작품과 설치전경

○ 수리 실험 진행 전경은 그림 3-25에 있음
- 주파수는 0.15, 0.2 Hz로 변경
- 유속은 0.4m/s임
- 부하는 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.7 Nm로 변경
- 진동자 형상 변경 시 미세 진동과 함께 충격이 있어 damper가 필요함을 파악함
- 상하 곡면이 다르게 형성되어 동기화가 필요

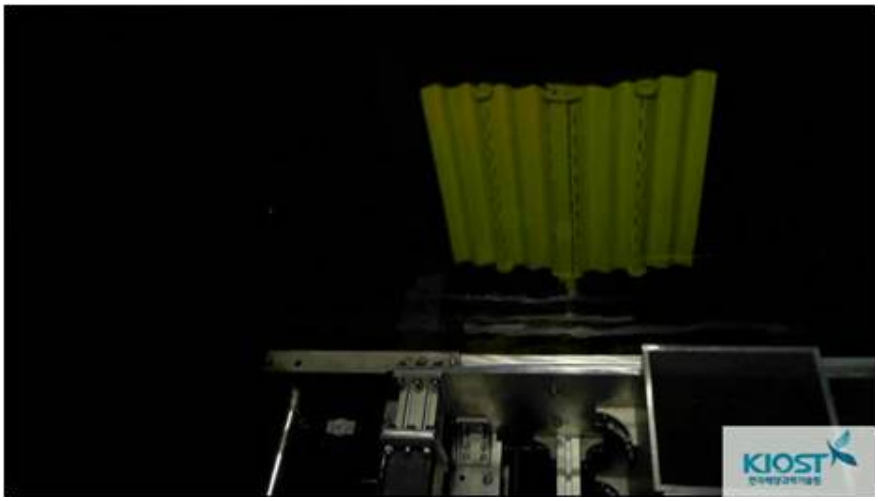


그림 3-25 예인수조 결합 후 수치실험 전경

○ 실험 결과는 그림 3-26에 있음
- 진동자 형상 변경을 위한 시간이 필요하여 저주파에서 실험 수행
- 주파수 영향은 강체 진동자와 유사
- 진동자 무게에 의한 영향이 커서 중성부력 고려가 필요함
- Arm Angle, 35 °에서 최대 효율 30% 얻음

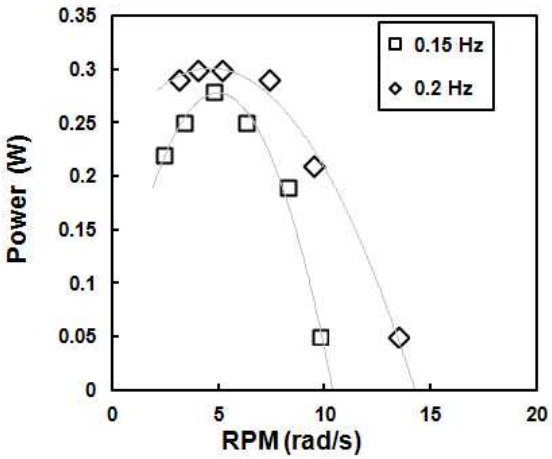


그림 3-26 RPM에 따른 출력 곡선

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도

○ 정성적 연구목표

- 진동식 터빈 실험 장치 개선 .... 100% 달성
  · 듀얼 시스템용 동력전달계 개발 및 조립
  · 이를 통한 파워 변동성을 낮추고 효율을 높임
- 생체 형상 진동식 터빈 심화 연구 ..... 100% 달성
  · 유동해석을 통해 최적 형상 도출
  · 이를 공학적으로 구현하고 생체 형상 진동자 제작하였으며 30% 효율 얻음

○ 정량적 연구목표

- 관련 주제 논문 1편(주저자급) ..... 200% 달성
  · Bioinspiration & Biomimetics (SCI급) 논문 1편
  · European Wave and Tidal Energy Conference 2013 (국제 학회) 논문 1편

- 국내 특허 출원 .... 추가 달성
  · 반복승강식 조류발전기의 자동 굴곡형 왕복장치 10-2014-0014712

○ 신형식인 진동식 조류 발전기 기술 개발을 통한 관련 분야의 경쟁력 향상에 기여함

- 진동식 조류발전기는 저수심 및 저유속에서도 발전 가능한 시스템으로써, 조류 부존량 확대에도 기여
- 진동식 조류발전기는 자연친화적인 특성과 더불어 근접발전이 가능하여 한정된 공간에서 최대 발전량을 추출할 수 있는 가능성을 보임

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 및 향후계획

1. 활용계획

○ 진동식 조류발전기 실험 장치 완비를 통한 지속적 진동자 개발에 활용 가능

○ 진동식 발전기 효율 계산을 위한 수치적 및 실험적 검증 방법을 통한 설계 개선에 활용

○ 혁신적 발전 방식과 고효율/친환경적인 특성을 가지고 있는 진동식 조류발전기의 원천과 실용화 기반 기술 개발을 통해 관련 산업에서 활용 가능함

2. 향후계획

○ Full passive system 개발을 통해 피치제어 에너지 소모를 최소화

○ 수중 fatigue 실험 및 해석을 통한 구조적 안전성 확보

○ 항력을 이용한 추가 발전 장치 제안

○ Tandem 발전 유동 가시화 및 물리적 특성 규명

- NATURE 혹은 SCIENCE 논문 게재를 목표로 연구 수행할 예정임

○ 상기 추가적인 연구를 위해 한국해양과학기술원 내부나 에너지기술평가원 등 외부 연구비 수주가 필요하고, 제안서 작성을 준비 중에 있음

제 6 장 참고문헌

E. J. Anderson, P. S. MacGillivray and M. E. DeMont, (1997) *Biol. Bull.* **192** (3), 341-344.

A. E. Carsen, B. G. Hatcher and R. E. Scheibling, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **203**(2),223-243(1996).

K. D. Jones and M. F. Platzer, 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, 1997.

F. E. Fish et al. (2011) *Marine technology society journal* 45(4) 198-207 .

J. C. S. Lai and M. F. Platzer,*AIAA J.* **37** (12), 1529-1537 (1999).

D. Minchin,*J. Mar. Biol. Assoc. UK* **72**,807-819(1992).

B. J. Pennington and J. D. Currey,*J. Zool.* **202**(Feb),239-263(1984).

B. J. Simpson, MIT, 2009

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.