

해류 발전 기술 및 응용

해류 발전의 기술 동향과 특성에 대해 알아보고, HAT 방식 해류 발전 시스템의 로터에 대하여 연구한 결과를 소개한다.

조 철 희

인하대학교 선박해양공학과 (chjo@inha.ac.kr)

서 론

기존의 태양 및 풍력 발전은 기상 상태에 많은 영향을 받고, 파력이나 해양 온도차 발전은 국내 여건에 적용하기에 많은 한계를 갖고 있다. 또한, 낙차를 이용한 조력 발전은 건설 및 개발 비용이 많이 들고, 유지·보수가 어려우며, 해양 환경에 막대한 영향을 미친다. 특히, 갯벌의 황폐화 및 방대한 지역이 요구된다. 이에 비해, 본 해류 발전은 큰 간만의 차로 인한 해류의 속도가 큰 서해안 지역에 효과적으로 적용이 가능하다. 날씨의 변화와 상관없이 지속적인 발전이 가능하며 오염 없는 청정 에너지원으로 사용될 수 있다.

해류 발전은 해류의 흐름을 이용하여 해류의 운동 에너지를 회전 에너지로 변환시켜 전기를 얻는다. 본 논문에서는 해류 발전의 기술 동향과 특성에 대해 알아보고, HAT(Horizontal Axis Turbine) 방식 해류 발전 시스템의 로터에 대하여 연구한 결과를 소개하고자 한다. 국내에서는 이런 분야의 연구가 매우 초보 단계이지만, 이미 외국에서는 해류를 이용한 발전 시스템 연구가 진행되어왔다. 해류 발전의 요구 조건과 현실적으로 고려되어야 할 기본적인 연구와 그 형태는 Garbuglia et. al. (1993), Young (1995), Bernshtein (1995) 등 여러 학자에 의해 발표되었다. 특히 Paish and Fraenkel (1995)는 새로운 개념의 해류 발전 시스템을 소개하여 실험역에서 실험을 수행하였다. 일본에서는 이와는 다른 형태인 Darrieus 형태의 연구가 진행되었다(Shiono et. al., 1999). Walsum (1999)은 캐나다의 Fundy에서

응용되는 형태를 소개하였다. 국내에서는 남서해안에 훌륭한 해류 자원이 분포되어 있으며 적은 초기 투자 비용으로 단기간에 개발과 적용이 가능하다(조철희 등, 1999). 본 연구에서는 풍력 발전의 이론과 발전 터빈의 이론식에 바탕을 두어 HAT 방식 해류 발전 시스템의 로터를 설계하고 모형 제작과 실험을 통하여 로터의 특성을 검토하였다.

대체 에너지

대체 에너지를 포함한 재생, 비재생 에너지들의 특성 및 경제성 비교는 미국에 의해 다음 표 1, 2와 같이 발표되었다. 아래에 나타난 바와 같이 해류 발전은 타 에너지원과 비교해 볼 때 발전에 제한 조건이

<표 1> 에너지 발전 비용 비교 (Garbuglia et. al., 1993)

에너지 발전 방식	Unit Cost (US \$ / kWh)	비 고
해류 발전	3 ~ 6	선박의 항해 및 어로 행위에 영향
태양력 발전	20 ~ 50	기상 조건에 좌우됨, 발전 지역의 황폐화
수력 발전	3 ~ 5	큰 낙차와 높은 시설비 요구
풍력 발전	11 ~ 22	기상 조건에 좌우, 넓은 부지 필요
천연가스 발전	3 ~ 4	공해
화력 발전 (Oil)	5 ~ 6	공해
화력 발전 (Coal)	4 ~ 5	공해
원자력 발전	3 ~ 4	핵폐기물 처리의 곤란

<표 2> 대체 에너지 특성 비교

대체 에너지 종류	제한 조건	비 고
원자력 에너지	- 원료의 전량 수입 의존 - 발전부지의 제한 - 핵폐기물 처리 비용 증대	다른 자원과 비슷한 에너지 비용, 폐기물 처리 및 방사능 오염
태양 에너지	- 높은 개발 비용 - 설치 지역의 황폐화 - 낮은 밀도의 에너지	국내 자연 조건에 경제성이 결여됨
지열 에너지	- 국지적인 발전 지역 - 화산 활동의 조절 능력 필요 - 시추시 고온에 의한 난점	국내에는 화산성 지열의 부재로 개발 요건 결여
풍력 에너지	- 기상에 영향을 받음 - 태양 에너지와 같은 저밀도 에너지 - 넓은 면적의 부지 소요	국내 자연 조건으로는 대형화가 부적합
조력 에너지	- 대규모 댐 시설 필요로 높은 시설비 - 갯벌의 황폐화 등 해양 환경의 악영향 - 제한적인 발전 주기	해상 교통의 단절 및 막대한 초기 투자 비용, 환경의 악영향 등으로 부적합
파력 에너지	- 높은 파고 필요 - 높은 설비 비용 - 설치 지역 보호	국내 해양 조건에 경제성이 없어 부적합
온도차 에너지	- 높은 시설비 - 큰 온도차 필요 - 복잡한 설비와 수요 지역에서 먼 발전 시설	저위도 지역에 적합한 시스템으로 국내 해양 환경에 부적합
해류 에너지	- 깊지 않은 수심에서 높은 유속의 해류, 조류 필요 - 발전 가능 지역의 제한 - 연구개발 필요	중장기적인 경제성으로 국내 남서해안 지역에 적합한 방식

나 단점을 거의 찾아볼 수 없으며, 국내 자연 환경에 적용하기에 많은 장점을 지니고 있다. 또한 기존의 비재생성 에너지(화력 및 원자력)와 대등하게 발전 비용이 저렴해 재생성 청정 에너지로 손색이 없음을 확인할 수 있다.

아직 국내에서는 해류 발전에 관한 본격적인 연구가 수행되지는 않았고 인하대학교와 영국의 Strathclyde 대학과 해류 발전 연구 교류가 이루어지고 있다. 단, 댐을 지어 낙차를 이용하는 조력 발전에 관해서는 1920년 일본인에 의해 인천만 일대가 검토되었고 1970년대부터 수차례에 걸쳐 서해안 10개 지점을 대상으로 한 타당성 검토 결과, 제 1 후보지로 가로림만이 선정되었고 제 2, 3 후보지로 천수만과 인천 근해의 신도 해역이 된 적이 있다. 해외 연구 현황을 살펴보면 다음과 같다.

- 영국 : 1990년대 초부터 활발히 해류 발전을 비롯한 대체 에너지 연구가 진행되고 있다. 모형 실험 및 수치 시뮬레이션을 통한 기술을 토대로

영국 남서부 Severn 강 하구에 타당성 검사 및 설치 계획을 갖고 있다. Strathclyde 대학을 중심으로 해류 발전 연구가 활발히 진행 중이다.

- 캐나다 : 정부(National Research Council of Canada)의 지원으로 대체 에너지 관련 연구가 오랫동안 꾸준히 진행되어왔다. The bay of Fundy에서 이미 발전 시스템을 설치하여 가동 중이다. 관련 대체 에너지 개발 기술은 이미 실용화 단계로 접어들었으며 전문적인 대체 에너지 회사들이 사업을 하고 있다. 특히 Blue Energy Canada Inc.에서는 자체적인 Davis 터빈을 개발하여 필리핀, 멕시코 등지에 기술을 수출하여 시설물을 설치하고 있다. 캐나다에서는 아주 활발히 관련 연구가 진행되고 있다.
- 미국 : 2010년까지 13.1%의 대체 에너지 보급 비율을 목표로 대체 에너지 연구에 박차를 가하고 있다. 해류 발전 시스템은 영국이나 캐나다에 비해 많은 연구가 되고 있지는 않으나 Tidal

Electric Inc.에서는 독자적인 기술을 개발하여 대상 지역을 연구하고 있다. Alaska, Chile, Europe, India, Mexico에 이미 Project를 수주하여 실용화 시설을 연구하고 있다.

- 일본 : 2010년까지 5.2%의 대체 에너지 보급 비율을 목표로 여러 가지 종류의 대체 에너지 연구를 수행하고 있다. 해류 발전 시스템은 1984년부터 연구가 시작되었고 조력 발전과 연계하여 타당성 조사가 이루어졌다. 특히 Darrieus 터빈을 도입하여 많은 실험이 행하여 졌다. 일본의 Nihon 대학에서 주로 정부의 지원을 받아 많은 연구가 이루어지고 있다.
- 필리핀 : 1999년 5월 San Bernardino Strait에 캐나다의 Blue Energy Canada Inc.와 2200 MW 해류 발전 시스템 개발을 추진하기로 합의하였다. 50년 동안 발전을 목표로 한 이 계획은 6년에 걸

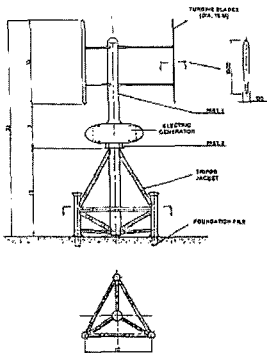
쳐 \$2.9 billion이 투자될 예정이다.

- 멕시코 : 미국의 Tidal Electric Inc.와 합작으로 조력 발전 및 해류 발전 시설을 만들려고 추진 중이다. 특히 관심이 있는 지역은 멕시코 북쪽 Tijuana 지역으로 콜로라도 강의 상류이다. 이 지역은 간만의 차가 22'로 해류의 속도도 높아 그 경제성이 높다고 할 수 있다.

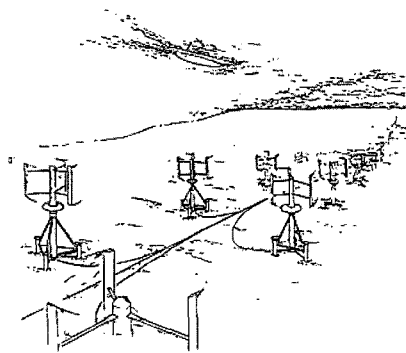
해류 발전의 여러 가지 발전 방식 중에서 대형화가 가능하고, 효율과 출력이 높은 발전 시스템으로는 다음 두 가지로 분류된다.

- VAT (Vertical Axis Turbine), 수직축 터빈
Darrieus Turbine, Davis Turbine
- HAT (Horizontal Axis Turbine), 수평축 터빈
Pile 고정식, 부유식

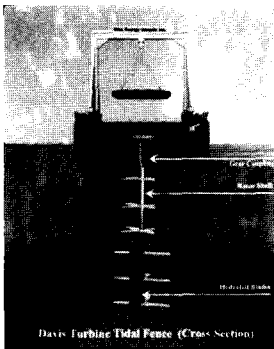
그림 1, 2는 전형적인 VAT 방식인 Darrieus 터빈을, 그림 3, 4는 Darrieus 터빈의 응용인 Davis 터빈



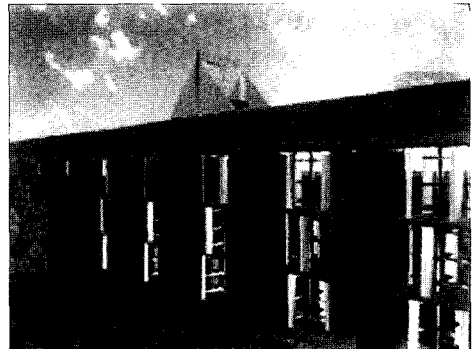
[그림 1] Darrieus 터빈의 개형도



[그림 2] Darrieus 터빈의 시스템 개념도



[그림 3] Davis 터빈의 개형도



[그림 4] Davis 터빈의 시스템 개념도

의 개형을 나타낸 것이다. VAT 방식은 낮은 유속에 서 성능의 저하, cavitation에 의한 구조적 불안정, 해양 환경의 영향, 유지·보수의 난점, HAT 방식에 비해 높은 시설비 등으로 국내 남서해안의 환경에는 적합하지 않은 방식으로 판단된다.

그림 5, 6의 HAT 터빈은 구조적으로 간단하고 안정하며, 넓은 범위의 유속에 대해서 출력이 안정적이고, VAT 방식에 비해 현저하게 낮은 시설비, 유지·보수의 용이 등으로 국내 남서해안 환경에 적합한 방식이다. 특히, 부유식에 비해 구조적으로 간단하고 안정적이며 경제적인 Pile 고정식이 수심이 깊지 않고 유속이 높은 국내 환경에 최적의 시스템이다.

효과적인 해류 발전에 관한 연구를 위해 해류 발전의 타당성이 입증된 지역에 대해 지역 환경을 고려한 정확한 실험과 연구가 진행되어야 한다. 이를 통해 잠재적 에너지 자원을 실용화하고 그에 대한 부가가치를 높일 수 있다. 해류 발전에 관한 기술 개발과 실해역 적용을 위해 다음과 같은 기술들이 요구된다고 할 수 있다.

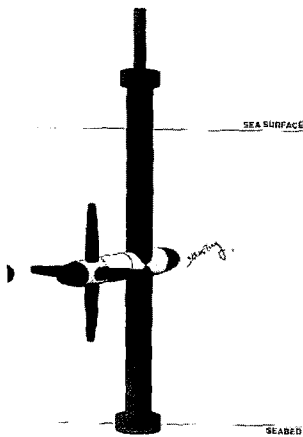
- 양방향 발전 시스템 기술
- 블레이드 설계 기술
- 수중 착탈식 조립 기술
- 자동 방향 전환 기술
- 해저 지지 구조물 설계 기술
- 제작 및 실용화 기술

해류 발전의 특징은 댐의 건설로 막대한 시설비와 갯벌의 파괴와 같은 해양 환경의 악영향을 피할 수 있는 환경 친화적인 발전 방식이며, 다른 대체 에너지와는 달리 기상과 계절의 영향을 받지 않으며, 특히 조석의 주기에 따라 간헐적으로 전력을 생산하는 조력 발전과 다르게 매일 11.7~13.1 시간 동안 꾸준히 전력을 공급할 수 있는 장점이 있다. 해류 발전은 섬이나 해안 시설물에 지속적인 전력원으로 도입이 가능하며 대규모 모듈의 시스템화시 남서해안 지역의 지속적인 전력 공급이 가능하다.

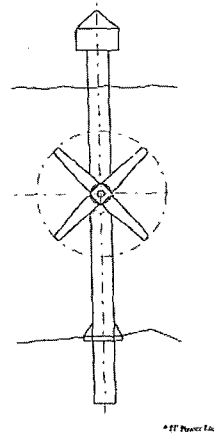
인천 지역의 잠재적인 발전량은 비록 유체의 밀도와 점성이 다르지만 풍력 발전 이론을 적용하여 예측할 수 있다. 기초 이론으로 풍력 터빈에 대한 Betz 이론을 도입하였고, 인천 지역의 조건에 맞게 일차적으로 설치할 수 있는 발전 시스템을 적용하여 발전량을 예측 산출하였다.

태안 반도 이북과 강화도 이남에서의 수심을 30 m로 가정하고 유속은 연간 평균 대조기의 최강 유속인 2.8 knots(1,440 m/s)를 기준으로 하였다. 해류의 유향에 수직으로 수선 길이 90 km인 투영 면적을 계산하였을 때 $A = 90(\text{km}) \times 30(\text{m}) = 2700000 (\text{m}^2)$ 이 된다. 그러므로 위 식에 의해 인천 근해의 서해안 지역의 에너지 부존량은 $4.136 \times 10^6 \text{ kW}$ 가 되며 연간 발전량은 $4,136,000 \text{ kW} \times \text{year} \times 365 \text{ day/year} \times 24 \text{ h/day} = 3.623 \times 10^{10} \text{ kWh}$ 가 된다.

물론 이론적으로 계산한 발전량은 실제 이용 면적



[그림 5] Pile 고정식 터빈-1



[그림 6] Pile 고정식 터빈-2

에 따라 달라지며, 본 논문에서는 국내 해양에 엄청난 발전 가능성이 있다는 것을 단적으로 보여주는 데 의미를 두어야 한다.

로터 설계 및 실험

로터를 설계하기 위하여 설계 유속과 설계 회전수를 표 3과 같이 상사 법칙을 적용하였으며 이 조건 하에서 풍력 발전 로터의 설계 이론을 적용하여 모형 로터의 주요 설계 변수를 결정하였다. 인하대학교 유동소음제어연구실에서 개발한 iDesignFan이라는 프로그램을 이용하여 HAT 로터를 설계하였다. 모형 실험용 로터의 직경은 350 mm이며 허브의 직경은 80 mm이고, 실험 모형은 유입 유속 0.63 m/s 와 회전수 158.1 rpm에서 최적의 효율을 갖는 것으로 계산되었다.

블레이드의 개수 및 단면 형상에 따른 성능 분석을 위하여 그림 7과 같이 세 가지의 로터를 설계하였다. 입력한 설계 변수는 표 4와 같다.

실험 모형은 알루미늄 주물로 제작하였고 지지 구조물은 강관으로 제작하였다. 제반 성능의 분석을 위하여 RPM 게이지를 사용하였고 출력을 계측하였다. 세 가지 로터의 유속에 대한 회전수의 변화와 출력 전압을 측정하여 출력, 효율 등을 계산하였다. 유속의 변화에 따른 회전수, 출력 및 효율을 측정하기 위하여 유속을 0.3~1.2 m/s 범위에서 0.05 m/s 씩 증가시키면서 실험 모형의 제반 성능을 계측하였다. 회전수에 대한 제반 성능을 분석하기 위하여 25 rpm씩 증가시키면서 50~375 rpm의 범위 내에서 출력과 효율을 측정하였다. 또한 유속을 0.30 m/s에서 0.01 m/s씩 증가시키면서 각 모형 로터의 임계 유속과 자기 시동 유속을 측정하였다.

실험 분석

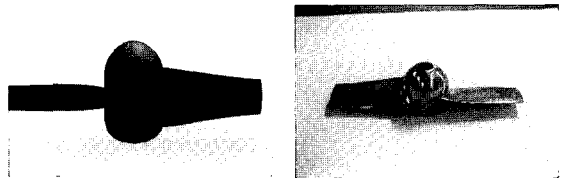
블레이드 수에 대한 로터 성능을 위해 동일한 설계 변수에서 동일 날개 면적의 2 개의 블레이드 로터와

<표 3> 로터 비교

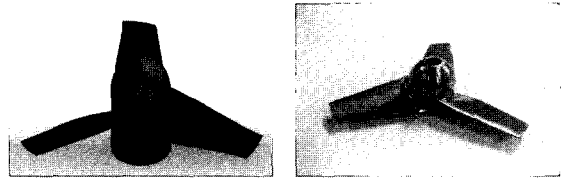
	현장 실험 로터	모형 로터	비 고
로터 직경 (m)	3.5	0.35	$\lambda_D = 10.0$
유입 유속 (m/s)	2.0	0.63	Fn 에 의한 상사
회전수 (rpm)	50.0	158.1	전진비에 의한 상사

<표 4> 로터 설계 특성

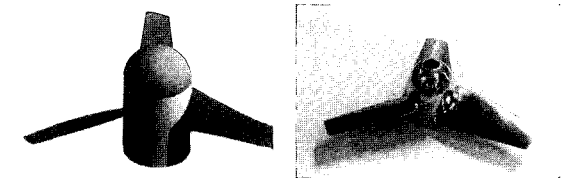
로터 형태	날개수	단면 현상	공통 설계 변수
2 블레이드 대칭 단면 (2B2D)	2	Arc 대칭	- 로터 직경 : 0.35 m - 허브 직경 : 0.08 m
3 블레이드 대칭 단면 (3B2D)	3	Arc 대칭	- 효율, η : 70% - 회전수, N : 158.1 rpm
3 블레이드 Airfoil 단면 (3B1D)	3	Airfoil	- 유입 유속 : 0.63 m/s - solidity, σ : 0.2



(a) 2B2D 설계와 모델

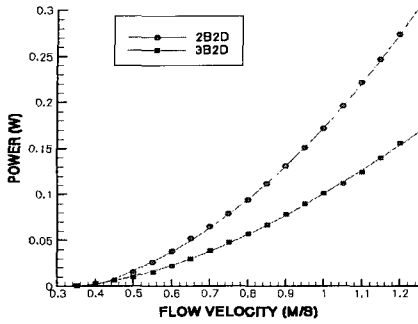


(b) 3B2D 설계와 모델

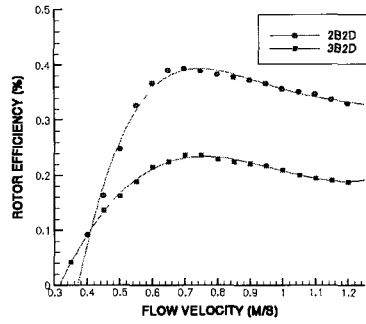


(c) 3B1D 설계와 모델

[그림 7] 로터 형상

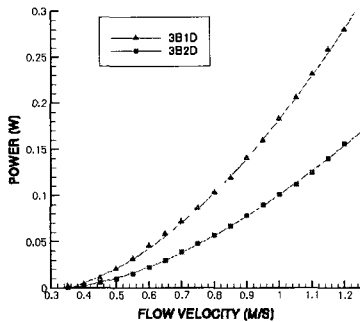


(a) 유속과 출력

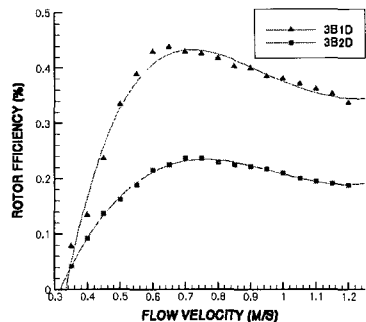


(b) 유속과 효율

[그림 8] 블레이드 수와 로터 효율



(a) 유속과 발전량

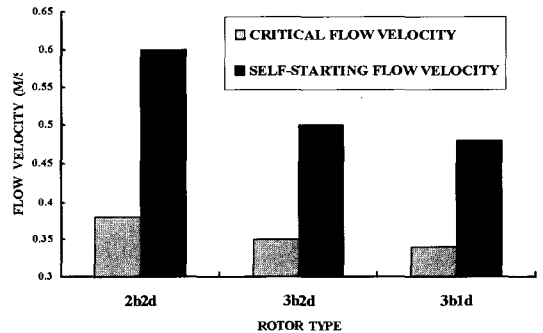


(b) 유속과 효율

[그림 9] 블레이드 형태와 효율

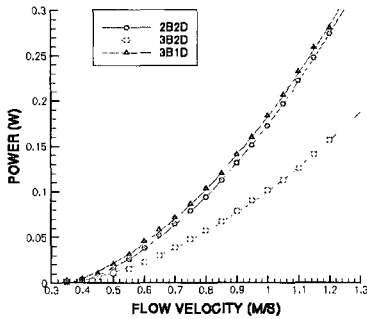
3 개의 블레이드 로터를 비교하였다. 그림 8과 같이 회전수와 출력 전력 모두 2블레이드의 로터가 3블레이드의 로터보다 높은 성능을 나타낸다. 대칭 단면 블레이드 로터와 에어포일 단면 블레이드 로터의 유속에 대한 출력 전력과 효율 모두 에어포일 단면 로터가 대칭 단면 로터보다 높은 유속에서 뿐 만 아니라 저속에서도 현저히 높은 성능을 나타낸다(그림 9).

세 가지 형태의 로터에 대하여 0.30 m/s부터 0.01 m/s씩 점진적으로 유속을 증가시키며 임계 유속과 자기 시동 유속을 측정하였고 3블레이드의 로터가 2블레이드의 로터에 비하여 현저히 낮은 유속에서 회전이 이루어지는 것을 볼 수 있으며 블레이드의 단면 형상은 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다(그림 10). 블레이드의 수가 증가하면 간섭 효과가 증가하여 효율이 저하되지만 저속에서의 자기 시동과 임계 유속 면에서 유리함을 확인할 수 있다.

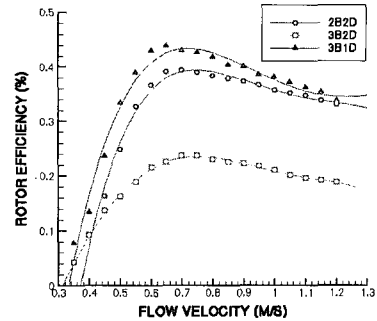


[그림 10] 임계 속도 비교

각 로터에 대한 출력과 효율의 결과를 그림 11, 12에 각각 나타내었다. 모든 유속에 걸쳐 에어포일 단면 형상을 갖는 3블레이드 로터가 가장 높은 출력을 나타내며 고속으로 회전할 경우 동일 단면 형상



[그림 11] 유속과 출력



[그림 12] 로터 효율 비교

로터일 때 2블레이드의 로터가 3블레이드의 로터보다 좋은 출력과 효율을 갖는다. 계측 결과를 토대로, 2블레이드 로터가 3블레이드 로터보다 출력과 효율이 우수함을 볼 수 있으며 에어포일 단면의 로터가 대칭 단면의 로터보다 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 단, 자기 시동 성능과 임계 유속에 대해서는 2블레이드 로터가 낮은 유속에서는 자기 시동이 되지 않고 효율이 떨어진다.

결론

본 연구를 통해 설계 이론에 의한 모형 로터 설계의 타당성을 검증하고 설계 변수의 변화에 대한 성능을 분석하였다. 세 가지 로터의 성능을 분석한 결과 에어포일 단면 형상을 갖는 2블레이드의 로터가 가장 성능이 우수한 것으로 나타났으며, 이를 실험역에 적용하기 위해서는 저속에서의 로터 성능과 자기 시동 문제, 주기적으로 변하는 해류 방향에 대한 로터의 응답, 그리고 제작의 용이성과 구조적 안정성이 고려되어야 한다. 해류 발전은 다른 대체 에너지와 달리 예측 가능하며 연속적인 발전이 가능할 뿐 아니라 국내의 해양 조건에 가장 적합한 형태이며 앞으로 지속적인 연구가 절실하다고 판단된다.

참고 문헌

1. 조철희, 김경수, 정택선, 민경훈 (1999). "인천지역에 적합한 해류발전 시스템에 대한 고찰", 조선학회 춘계학술대회, pp 78-82.

2. Allan, W. R., (1983). "Axial Flow Fans and Ducts", Wiley & Sons.
3. Bernshtein, L. B. (1995). "Tidal Power Development-A Realistic, Justifiable and Topical Problem of Today", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 10, pp 591-599.
4. Garbuglia, E., Rosa A. D. and Berti, D. (1993). "Exploitation of Maine Current Energy", Offshore Technology Conference, pp 509-519.
5. Paish, O. and Fraenkel P. (1995). "Tidal Stream Energy: Zero-Head Hydropower", International Conference on Hydropower into the Next Century, pp 1-12.
6. Shiono, M., Suzuki, K., and Kiho, S. (1999). "Experiments on the Characteristics of Darrius Turbine for the Tidal Power Generation", Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol 1, pp 123-128.
7. Todd, F. H. and Taylor, D. (1991), "Principles of Naval Architecture - Propulsion", Society of Naval Architects and Marine Engineers.
8. Walsum, W. V. (1999). "Offshore Engineering for Tidal Power", Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol 1, pp 777-784.
9. Young, R. M. (1995). "Requirements for a Tidal Power Demonstration Scheme", Journal of Power and Energy, Vol 209, pp 215-220. (E)