

# 수평축 해류발전 로터의 설계와 성능해석

조철희\* · 김경수\* · 민경훈\* · 양태열\*\* · 이현상\*\*\*

\*인하대학교 선박해양공학과, \*\*금정공업(주), \*\*\*중앙조선(주)

## Study on HAT Current Generation Rotor

CHUL-HEE JO\* · KYUNG-SU KIM\* · KYOUNG-HOON MIN\* · TAE-YUL YANG\*\* AND HYUN-SANG LEE\*\*\*

\*Dept. of Naval Archi. and Ocean Engi., Inha University, \*\*Keumjung Ind. Co. Ltd., \*\*\*Joongang Shipbuilding & Engineering Co. Ltd.

**KEY WORDS:** HAT 수평축, Rotor 회전자, Blade 익, Current Generation 해류발전, Stagger Angle 블레이드 설치각

**ABSTRACT:** In this research, a design guideline of current generating HAT rotor and acceptable field rotor in offshore environment is proposed. To design HAT rotor model, wind mill rotor design principles and turbine theories were applied based on a field HAT rotor experimental data. To verify the compatibility of the rotor design method and to analyze the properties of design factors, 3 rotor models were designed and experimented in a circular water channel. Three rotor models were designed according to different blade numbers and blade shapes. By changing flow velocity, rotor rpm, the rotor power and efficiency were measured and the properties of rotor were estimated. The results can be effectively applied to the design of current generation rotor.

### 1. 서 론

해류 에너지 변환시스템은 해수의 운동에너지를 이용하여 해수의 흐름으로부터 에너지를 취득한다. 이 방식은 조수간만의 차를 이용한 조류발전이 아닌 해류의 흐름을 이용한 방식이며 해류의 운동에너지를 회전에너지로 변환시켜 전기를 얻는 형태이다. 회전 에너지로 변환하는 방식은 축 방향에 따라 크게 두 가지, Vertical Axis Turbine(VAT) 방식과 Horizontal Axis Turbine(HAT) 방식으로 분류된다. 본 논문에서는 HAT 방식 해류발전 시스템의 로터에 대하여 연구하였다. HAT 방식은 VAT 방식에 비하여 구조적으로 안전하고 간단하며 자기시동이 유리하여 넓은 범위의 해류속도에 대하여 적용이 원활하다는 장점을 갖고 있다.

국내에서는 이런 분야의 연구가 매우 초보단계이지만, 이미 외국에서는 해류를 이용한 발전시스템 연구가 진행 되어왔다. 해류발전의 요구조건과 현실적으로 고려되어야 할 기본적인 연구와 그 형태는 Carbuglia et. al. (1993), Young (1966), Bernshtein (1995) 등 여러 학자에 의해 발표되었다. 특히 Paish and Fraenkel (1995)는 새로운 개념의 해류발전시스템을 소개하여 실험실에서 실험을 수행하였다. 일본에서는 이외는 다른 형태인 대리어스 형태의 연구가 진행되었다 (Shiono et. al. (1999)). Walsum (1999)은 Fundy에서 응용되는 형태를 소개하였다.

국내에서는 남서해안에 훌륭한 해류자원이 분포되어 있으며

적은 초기투자 비용으로 단기간에 개발과 적용이 가능하다 (조철희 등 (1999)). 본 연구를 통하여 HAT 방식 해류발전 시스템을 설계하고 성능을 분석하여 최적의 발전 시스템을 제시하였다.

본 연구에서는 풍력발전의 이론과 발전터빈의 이론식에 바탕을 두어 HAT 방식 해류발전 시스템의 로터를 설계하고 모형 제작과 실험을 통하여 설계방법과 실험의 타당성을 검토하였다. 모형 실험을 위해 성능에 영향을 미치게 되는 여러 가지 요소들을 고려하여 로터를 제작하여 그 성능을 비교하였다. 블레이드 개수와 단면형상을 변화시켜 대칭단면 양방향 2블레이드 로터와 대칭단면 양방향 3블레이드 로터 그리고 에어포일 단면 단방향 3블레이드 로터를 설계 및 제작하여 0.3m/s~1.2m/s의 유속에서 0.05m/s 간격으로 실험하였다. 이러한 실험과 분석을 통하여 설계 방법의 타당성을 검증하고 로터의 형상과 유속이 성능에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하였다. 이를 바탕으로 HAT 시스템의 설계기준을 제시하고 실 해역에 적용 가능한 발전 시스템을 제시하였다.

### 2. 기본 이론 및 모형 설계

#### 2.1 모형 로터 설계

실험용 모형 로터를 설계하기 위하여 외국에서 실제 현장 실험한 로터의 크기와 유입속도를 고려하여 이에 상응하는 설계 유속과 설계 회전수를 Table 1과 같이 상사하였으며 이 조건하에서 풍력발전 로터의 설계이론을 적용하여 모형 로터의 주요 설계변수를 결정하였으며, 인하대학교 유동소음제어연구실에서 개발한 iDesignFan 이라는 프로그램을 이용하여 HAT 로터를 설계하였다. 모형 실험용 로터의 직경은 350mm이며 허브의 직경은 80mm이고, 현장실험 로터가 2.0m/s에서

제1저자 조철희 연락처: 인천시 남구 용현동 253 인하대학교

032-860-7342 chjo@inha.ac.kr

50rpm으로 회전할 때 가장 좋은 효율을 나타내므로 이 자료를 통하여 상사시킨 실험 모형은 유입유속 0.63m/s와 회전수 158.1rpm에서 최적의 효율을 갖는 것으로 계산되었다. 실제 로터로부터 실험 로터의 설계 유속과 설계 회전수는 다음 식 (1)~(3)에 의해 결정된다. (Todd, 1991)

$$\lambda_D = \frac{D_s}{D_m} \quad (1)$$

$$U_m = \frac{U_s}{\sqrt{\lambda_D}} \quad (2)$$

$$N_m = N_s \times \sqrt{\lambda_D} \quad (3)$$

- $\lambda_D$  : 기하학적 상사비
- $D_s$  : 현장 실험 로터의 직경 (m)
- $D_m$  : 모형 실험 로터의 직경 (m)
- $U_s$  : 현장 실험 유입 유속 (m/s)
- $U_m$  : 모형 실험 설계 유입 유속 (m/s)
- $N_s$  : 현장 실험 로터 회전수 (rpm)
- $N_m$  : 모형 실험 로터 설계 회전수 (rpm)

발전 터빈의 로터는 Fig. 1과 같은 속도 삼각형을 기본으로 설계된다. 본 연구에서는 해류의 일정속도를 기준으로 하였기에 평균유속법을 적용한 속도 삼각형을 고려한 전용 프로그램을 사용하여 각 요소 계산과 블레이드의 코드길이 및 설치각을 설계하였다. 기본적인 계산식은 다음과 같다.

1) 요소 계산

$$C_\theta = C_2 \times \cos \alpha_2 \quad (4)$$

$$\Delta P_T = \rho U C_\theta \quad (5)$$

- $\Delta P_T$  : 압력
- $U$  : 각속도 (m/s)
- $\rho$  : 유체 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

$$P [\text{power}] = \eta \times \dot{Q} \times \Delta P_T \quad (6)$$

- $\eta$  : 효율
- $\dot{Q}$  : 유량 (m<sup>3</sup>/s)

Table 1 Flow velocity and rpm of model rotor

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

2) 양력 계수 계산

$$C_L = 4.0 \times T_{\max} + 0.092 \times (5^\circ \sim 2^\circ) \quad (7)$$

- $T_{\max}$  : 블레이드의 최대두께 (m)
- 블레이드 각 - 5° : 허브, 2° : 익단

3) 로터의 블레이드 코드 길이 계산

$$C = \frac{\Delta P_T A \pi}{\eta W_\infty \rho \omega Z C_L} \quad (8)$$

- $W_\infty = (W1 + W2) / 2$
- $\omega = 2\pi N$  (rad/s)
- $Z$  : 블레이드 수
- $C_L$  : 양력 계수

4) 블레이드 설치각(stagger angle) 계산

$$\text{블레이드 설치각} \approx \beta_2 - \beta_1 \quad (9)$$

2.2 설계 결과

발전 터빈 로터의 설계이론을 바탕으로 만들어진 전용 설계 프로그램을 사용하여 로터를 설계하였으며, 블레이드의 개수 및 단면형상에 따른 성능분석을 위하여 세 가지의 로터를 조사하였다. 입력한 설계 변수는 Table 2와 같다.

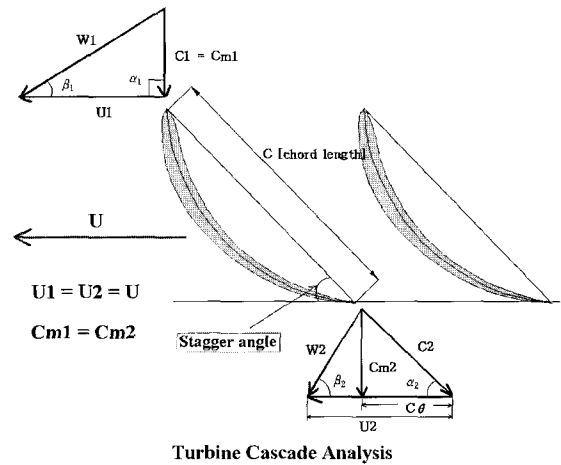


Fig. 1 Velocity triangle (Allan, 1983)

Table 2 Design factors of model rotor

로터 형태	날개 수	단면 현상	공통 설계 변수
2 블레이드 대칭단면 (2B2D)	2	Arc 대칭	- 로터 직경 : 0.35m - 허브 직경 : 0.08m
3 블레이드 대칭단면 (3B2D)	3	Arc 대칭	- 효율, $\eta$ : 70 % - 회전수, N : 158.1 rpm - 유입유속 : 0.63 m/s
3 블레이드 Airfoil 단면 (3B1D)	3	Airfoil	- solidity, $\sigma$ : 0.2

### 3. 실험

본 실험은 모형 로터의 설계 방법에 대한 타당성 검증과 로터의 요소 변화에 대한 성능 분석 실험으로 3가지 로터에 대하여 이루어졌다. 실험은 인하공업전문대학 회류수조에서 이루어졌으며 실험모형은 알루미늄 주물로 제작하였고 지지구조물은 강관으로 제작하였다. 제반 성능의 분석을 위하여 RPM 게이지를 사용하였고 발전기와 전압계를 연결, 출력을 계측하였다.

실험은 회류수조내에서 각 유속별로 성능을 계측하고 해석하는 방법으로 이루어졌다. 세 가지 로터의 유속에 대한 회전

수의 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 0.05m/s 씩 증가시키면서 실험 모델의 제반 성능을 계측하였다. 회전수에 대한 제반 성능을 분석하기 위하여 25rpm씩 증가시키면서 50~375rpm의 범위내에서 출력과 효율을 측정하였다. 또한 유속을 0.30m/s에서 0.01m/s씩 증가시키면서 각 모형 로터의 임계유속과 자기시동 유속을 측정하였다. 로터에 연결된 축은 강관으로 제작된 구조물에 지지되며 로터축에 장착된 풀리와 발전기에 장착된 풀리를 벨트가 연결하여 동력을 전달하도록 설계되었다. 변속비는 3.15 : 1이며 전달된 동력은 발전기를 구동시켜 전구에 전력을 전달한다. 발전기 풀리에서 RPM 게이지로 회전수를 측정하고, 회로에 전압계를 연결하여 각 유속에 대한 전압을 계측하였다. 실험 모형의 배치 개형도는 Fig. 2와 같으며 실험 모형의 설계도 및 제작모형은 Fig. 3과 같다.

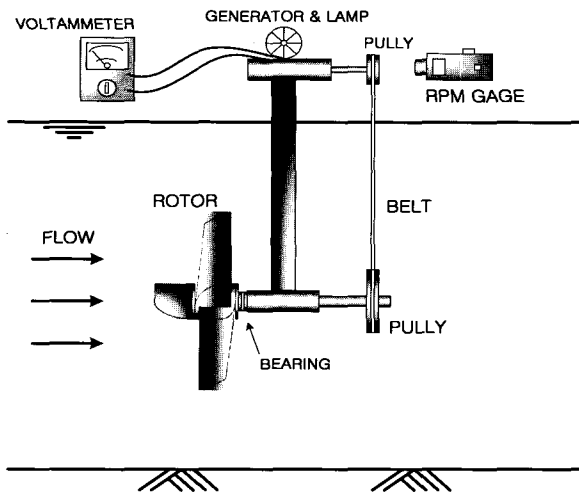
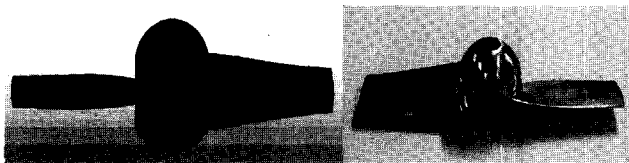
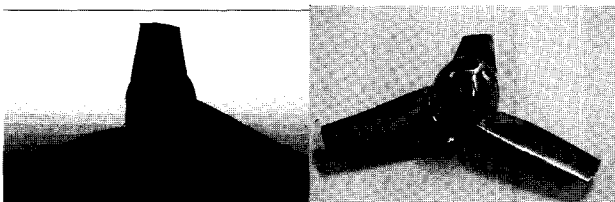


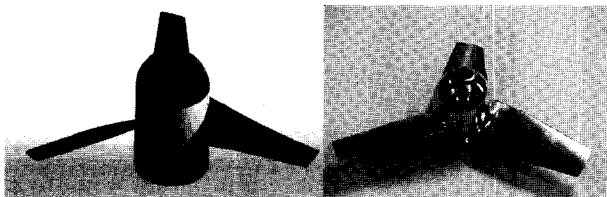
Fig. 2 Model arrangement



a) 2B2D design and model



b) 3B2D design and model



b) 3B1D design and model

Fig. 3 Rotor design and model

### 4. 실험 결과 및 고찰

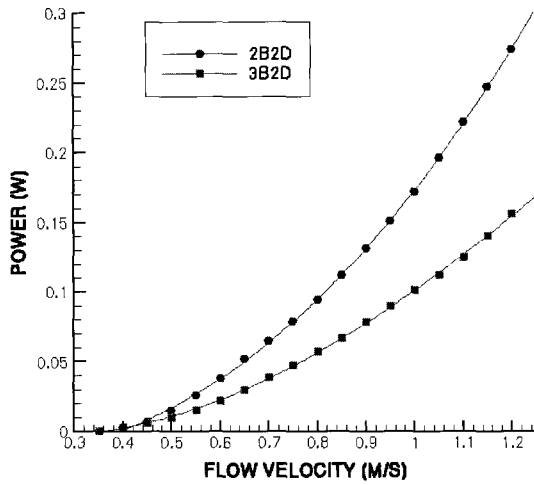
블FP이드 수와 형상에 따른 효율, 출력, 회전수등을 측정하였으며, 로터의 시동 성능을 분석하기 위하여 유속을 0.30m/s에서 증가시키면서 임계유속과 자기시동유속을 계측하였다.

#### 4.1 블레이드 수 변화

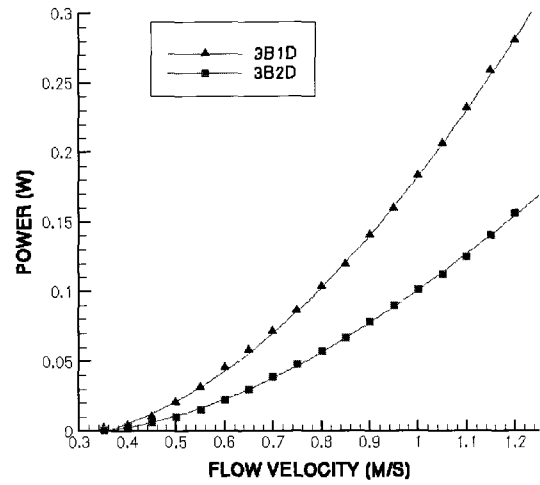
블레이드 수의 변화에 대한 로터의 성능을 분석하기 위하여 동일한 설계변수에서 동일 날개 면적의 2개의 블레이드를 갖는 로터와 3개의 블레이드를 갖는 로터를 비교하였다. 두 가지 로터의 유속에 대한 출력 전력과 효율은 Fig. 4에 나타내었다. 회전수와 출력전력 모두 2블레이드의 로터가 3블레이드의 로터보다 높은 성능을 나타낸다. 2블레이드 로터는 3블레이드 로터보다 높은 출력을 얻을 수 있지만 0.40m/s 미만의 저속에서 회전하지 못하는 단점을 나타내며 저속에서는 유사한 성능을 나타낸다. 유속이 증가함에 따라 효율 또한 증가하다가 0.65 ~ 0.70m/s에서 점차 감소하는데 이는 최고 효율을 갖도록 설계한 설계유속 0.63m/s에 근접한 결과로 설계의 타당성을 입증한다.

#### 4.2 단면 형상 변화

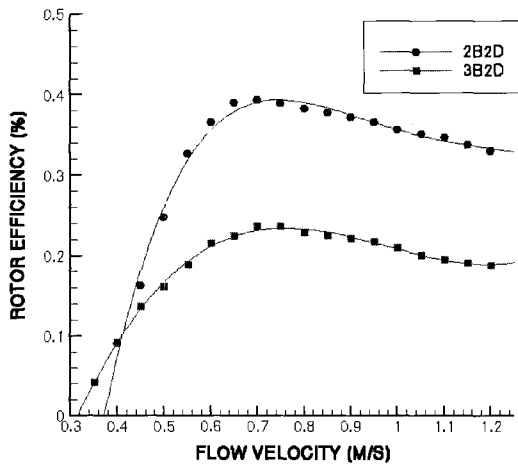
단면 형상의 변화에 대한 로터의 성능을 분석하기 위하여 단면형상을 제외한 설계변수를 같게 하여 두 방식의 로터를 비교하였다. 대칭 단면 블레이드 로터와 에어포일 단면 블레이드 로터를 설계, 제작, 실험하였다. 두 가지 로터의 유속에 대한 출력 전력과 효율은 Fig. 5에 도시하였다. 회전수와 출력전력 그리고 효율 모두 에어포일 단면 로터가 대칭 단면 로터보다 높은 유속에서만 아니라 저속에서도 현저히 높은 성능을 나타낸다. 에어포일 로터가 단면 대칭 로터보다 높은 출력을 얻을 수 있는 이유는 에어포일 로터가 회전함에 따라 발생하는 양력이 로터가 회전하는 방향으로의 힘의 벡터가 작용하기 때문이다.



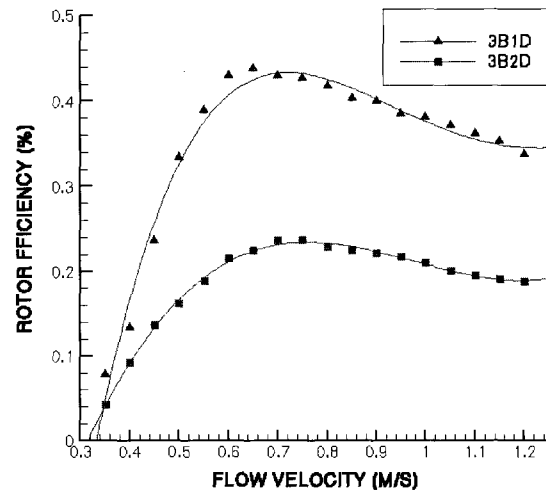
a) flow velocity vs. power



a) flow velocity vs. power



b) flow velocity vs. efficiency



b) flow velocity vs. efficiency

Fig. 4 Number of blade vs. rotor efficiency

### 4.3 로터의 제반 성능 분석

로터의 제반 성능을 분석하기 위하여 발전 시스템의 적용에 중요한 영향을 미치는 여러 가지 요소들을 분석하였다. 회전수에 대한 로터의 출력을 계측하여 최적 성능을 갖는 회전수를 분석하였고 유속을 점진적으로 증가시키며 각 로터의 임계유속과 자기시동 유속을 분석하였다.

#### 4.3.1 회전수 대 성능

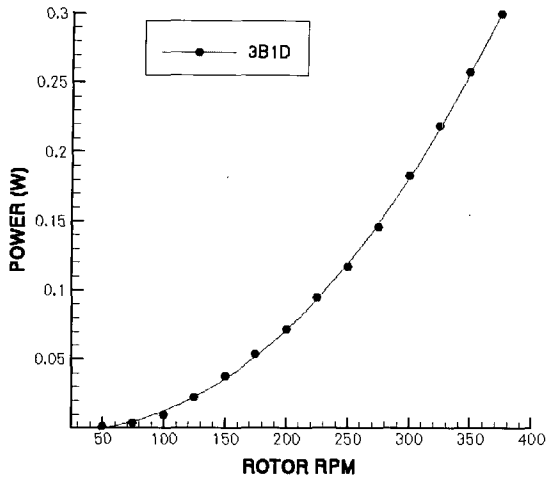
회전수에 대한 성능을 분석하기 위하여 출력 범위가 넓은 단방향 에어포일 단면 3블레이드 로터에 대해서 분석하였고, Fig. 6은 회전수 대 출력 및 효율을 보여준다. 회전수 대 출력과 효율 그래프는 유속 대 출력과 효율 그래프에서와 같은 경향을 나타내는데 이는 유속에 대하여 로터 회전수가 일차곡선의 형태를 갖고 선형적으로 증가하기 때문이다. 효율은 회전수의 증가에 대하여 증가하다가 165rpm 근방에서 최고 효율을 갖고 점차 감소하기 시작하는데 이는 158.1rpm의 설계 회전수

Fig. 5 Blade section shape vs. rotor efficiency

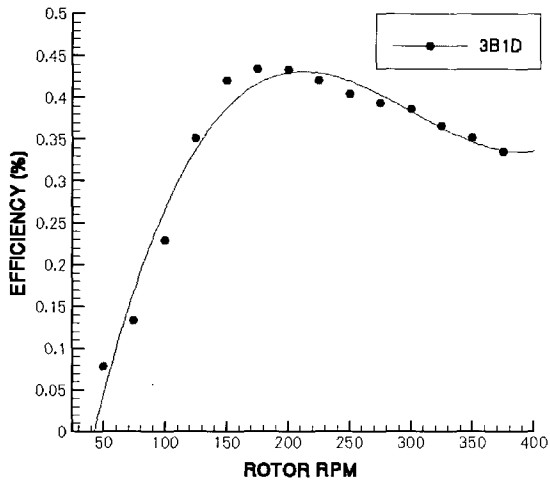
와 근소한 값으로 로터 설계의 타당성을 입증한다.

#### 4.3.2 자기시동 유속 및 임계 유속

세 가지 형태의 로터에 대하여 0.30m/s부터 0.01m/s씩 점진적으로 유속을 증가시키며 임계 유속과 자기시동 유속을 측정하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. 3블레이드의 로터가 2블레이드의 로터에 비하여 현저히 낮은 유속에서 회전이 이루어지는 것을 볼 수 있으며 블레이드의 단면 형상은 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 두 점보다 세 점에서의 모멘트가 회전을 부드럽고 쉽게 시작하게 하기 때문이다. 블레이드의 수가 증가하면 간섭효과가 증가하여 효율이 저하되지



a) rpm vs. power



b) rpm vs. efficiency

Fig. 6 Rotor rpm vs. efficiency

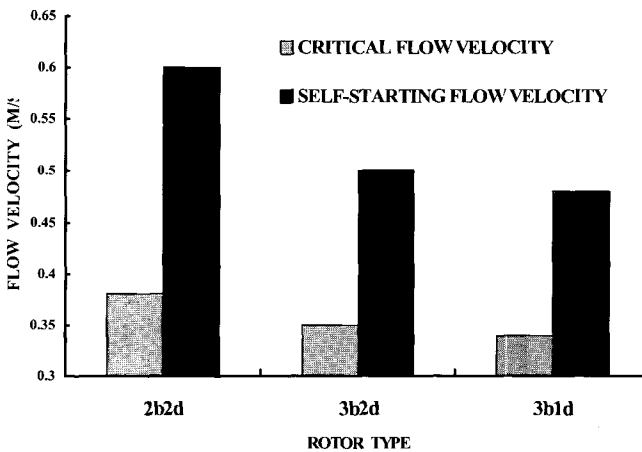


Fig. 7 Critical velocity vs. self-starting velocity

만 저속에서의 자기시동과 임계유속 면에서 유리함을 확인할 수 있다.

#### 4.4 각 로터의 성능 비교

각 로터에 대한 출력과 효율의 결과를 Fig. 8~9에 나타내었다. 모든 유속에 걸쳐 에어포일 단면형상을 갖는 3블레이드 로터가 가장 높은 출력을 나타내며 고속으로 회전할 경우 동일 단면 형상 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. 그러므로 가장 우수한 성능의 로터는 에어포일 단면의 2블레이드 로터이다. 다만 자기시동 성능과 임계 유속에 대해서는 2블레이드 로터가 낮은 유속에서는 자기시동이 되지 않고 효율이 떨어진다. 에

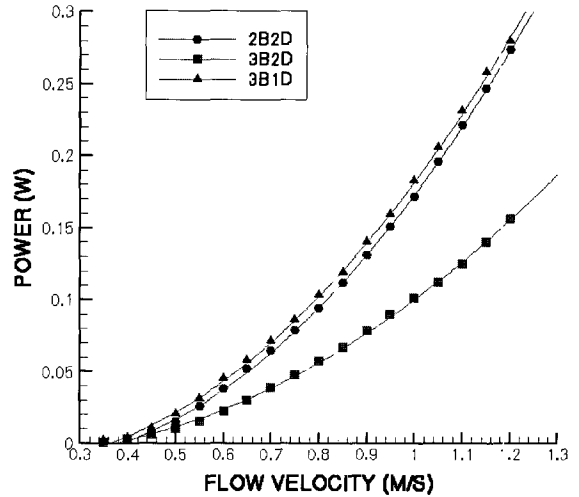


Fig. 8 Flow velocity vs. power

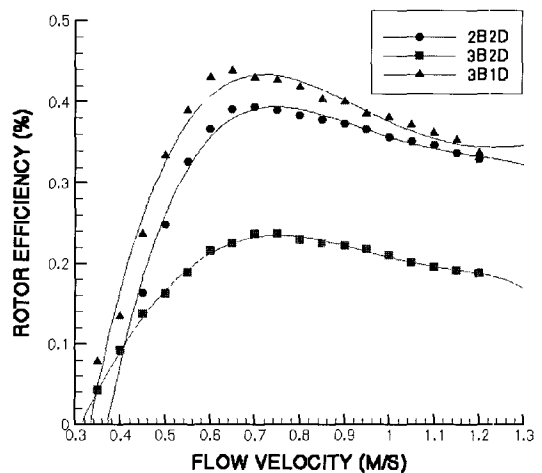


Fig. 9 Comparison of rotor efficiency

어포일 단면의 블레이드는 대칭 단면 블레이드보다 제작이 어렵고 구조적으로 안정성이 떨어지므로 유향이 주기적으로 변하는 해류에 로터가 방향을 조정할 수 있는 장치가 필요하므로 실해역에 적용할 로터는 여러 가지 환경요소를 고려하여 설계되어야 한다.

## 5. 결 론

본 연구를 통해 설계 이론에 의한 모형 로터 설계의 타당성을 검증하고 설계변수의 변화에 대한 성능을 분석하였고, 실험 및 분석을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 각 로터의 효율은 유속 및 회전수가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 설계유속 및 설계 회전수 부근에서 점차 감소하는 경향을 나타낸다.
- 동일 단면 형상에서 2블레이드 로터가 3블레이드 로터보다 높은 성능을 나타내며 동일 블레이드 수에서 에어포일 단면 형상의 로터가 대칭단면 로터보다 높은 성능이 증명되었다.
- 각 로터의 자기시동 유속 및 임계 유속은 블레이드의 수에 큰 영향을 받으며 2블레이드의 로터가 자기시동과 임계 유속이 현저히 높게 나타나 저속에서는 성능이 저하됨을 보여 준다.

세 가지 로터의 성능을 분석하여 보면, 에어포일 단면 형상을 갖는 2블레이드의 로터가 가장 성능이 우수한 것으로 관측되었으며, 실해역에 적용하기 위해서는 저속에서 로터의 성능과 자기시동 문제, 주기적으로 변하는 해류 방향에 대한 로터의 응답, 그리고 제작의 용이성과 구조적 안정성을 고려하여야 한다.

## 후 기

“이 논문은 제 9차년도 산학연 컨소시엄 사업 지원으로 연구

되었다.”

## 참 고 문 헌

- 조철희, 김경수, 정택선, 민경훈 (1999). “인천지역에 적합한 해류발전 시스템에 대한 고찰”, 대한조선학회 춘계학술대회, pp 78-82.
- Allan, W. R., (1983), “Axial Flow Fans and Ducts”, Wiley & Sons.
- 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.
- Garbuglia, E., Rosa A. D. and Berti, D. (1993). "Exploitation of Marine Current Energy", Offshore Technology Conference, pp 509-519.
- Paish, O. and Fraenkel P. (1995). "Tidal Stream Energy:Zero-Head Hydropower", Internaltional Conference on Hydropower into the Next Century, pp 1-12.
- Shiono, M., Suzuki, K. and Kiho, S. (1999). "Experiments on the Characteristics of Darrieus Turbine for the Tidal Power Generation", Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol 1, pp 123-128.
- Todd, F. H. and Taylor, D. (1991), "Principles of Naval Architecture - Propulsion", Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Walsum, W. V. (1999). "Offshore Engineering for Tidal Power", Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol 1, pp 777-784.
- Young, R. M. (1995). "Requirements for a Tidal Power Demonstration Scheme", Journal of Power and Energy, Vol 209, pp 215-220.

2001년 12월 23일 원고 접수

2002년 1월 29일 최종 수정본 채택