

## 복합배치 수평축 조류발전 로터의 간섭성능 고찰

조철희<sup>\*†</sup> · 이강희<sup>\*\*</sup> · 임진영<sup>\*\*</sup> · 노유호<sup>\*\*</sup>

### Interference Effects on the Performance of Multi-arrayed HAT TCP Devices

Chul-Hee Jo<sup>\*†</sup>, Kang-Hee Lee<sup>\*\*</sup>, Jin-Young Yim<sup>\*\*</sup>, Yu-Ho Rho<sup>\*\*</sup>

Key Words : Tidal current power(TCP: 조류발전), Renewable energy(신재생에너지), Rotor(로터), Horizontal axis turbine(HAT: 수평축터빈), Interference effect(간섭효과)

#### ABSTRACT

Tidal current power system is the energy converter which converts the kinetic energy of tidal stream into electric energy. The performance of the rotor which initially converts the energy is determined by various design factors and it should be optimized by the ocean environment of the field. Flow direction changes due to rise and fall of the tides, but horizontal axis turbine is very sensitive to direction of flow. To investigate the rotor performance considering the interaction problems with incidence angle of flow, series of experiments have been conducted. The results and findings are summarized in the paper.

#### 1. 서 론

세계는 현재 지구온난화 및 화석연료 가격상승으로 인해, 신재생에너지 기술개발을 위해 노력하고 있다. 여러 신재생 에너지원 중 조류발전을 포함한 해양에너지는 무한한 잠재력과 함께 큰 주목을 받고 있다.

현재까지 조류발전 시스템에 대한 많은 연구<sup>(1)(2)</sup>들이 소개되어졌으며, 새로운 시스템 개념과 실 해역테스트 결과<sup>(3)</sup>가 보고되고 있다. 일본에서는 다리우스 방식이 연구되었고<sup>(4)</sup>, 캐나다에서는 세계에서 가장 큰 조석차가 발생하는 Fundy만의 조류발전시스템<sup>(5)</sup>이 소개됐다. 국내에서 3종류의 다른 로터들의 특성이 실험을 통해 비교<sup>(6)</sup>되었으며, 다중모듈에 설치된 로터들의 간섭효과<sup>(7)</sup>와 방수로에 적용 가능한 첫 조류발전 시스템<sup>(8)</sup>이 소개되었다.

조류발전의 상용화를 위해 단지화가 요구되며 발전장치를 다배열로 설치해야 한다. 제한된 공간 내에 최대의 발전량을 얻기 위해 간섭을 고려하여 조류발전 장치를 배치해야 하므로 이에 대한 연구가 매우 중요하며, 특히 회전체인 로터에서 대부분의 간섭영향이 발생한다.

조류는 밀물과 썰물에 의한 흐름으로써 방향이 180° 바뀌고 지형적 영향에 의해 실시간으로 유향이 변화한다. 수평축 조류발전기는 회전축과 조류의 흐름방향이 수평일 때 이상적이며 회전축과 유향의 각도가 커짐에 따라 로터의 성능저하가 발생한다. 따라서 조류와 회전축이 수평을 이루도록 유향 변화에 능동적으로 대응할 수 있는 장치가 필요하다. 본 논문에서는 능동유향 장치의 연구에 앞서 유향의 변화가 로터성능 및 간섭에 미치는 영향을 연구하였다.

#### 2. 실 험

##### 2.1 로터 및 실험장비

본 논문에서는 날개요소 운동량 이론(Blade Element Momentum Theory)를 적용하여 로터를 설계하였다. 블레이드를 각각의 반지름에 대한 여러 단면을 나누어 각 단면에서의 익형을 설계하고 이를 연결하여 블레이드 형상을 결정하는 방법으로 풍력로터 및 기타 여러 유체기계의 설계방법 중 하나이다. 또한 설계변수인 팁 직경 대 허브 직경의 비(d/D)는 0.15이다.

본 설계에서는 최대두께가 코드길이의 20%에 해당하는 NACA 0020 익형을 사용하였으며, 영각( $\alpha$ )은 4° 양력계수

\* 인하대학교 선박해양공학과

\*\* 인하대학교 대학원 조선해양공학과

† 교신저자, E-mail : chjo@inha.ac.kr

Table 1 Specification of rotors

Description	Specification
No. of blade	2
d/D ratio	0.15
Diameter(m)	0.5
Airfoil type	NACA 0020
CL	0.8
$\alpha(^{\circ})$	4

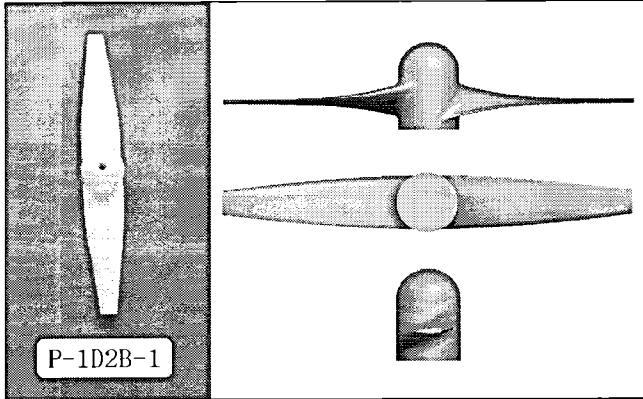


Fig. 1 Photo of two blades rotor

Table 2 Specification of CWC

	Main Particular	Measuring Section
Length[m]	6.0	2.3
Breadth[m]	1.0	1.0
Height[m]	3.0	0.9
Max. Velocity[m/s]	1.2	-

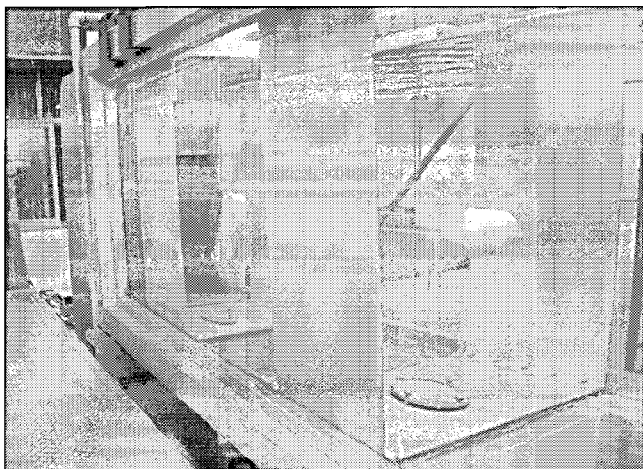


Fig. 2 Experiment arrangement

(C<sub>L</sub>)는 0.8이다. Table 1은 본 연구에 사용된 로터의 제원이며, Fig. 1은 설계된 로터형상과 제작된 로터 모형이다.

실험은 CWC(Circulation Water Channel)에서 수행되었으며 회류수조의 제원은 Table 2와 같다. 회류수조에 설치된

실험 장비는 로터를 유향에 대해 일정 각도로 고정시킬 수 있도록 고안되었다. 유향의 변화에 의한 성능 저하뿐만 아니라, 후방 로터에 일으키는 간섭영향을 파악하기 위해 2개의 장비가 Fig. 2와 같이 설치되었다.

### 2.2 실험 설정

Fig. 3와 같이 로터와 유향과의 각도( $\theta$ )를 정의하였으며, 측정 각도는  $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 까지  $15^{\circ}$  간격이다.

Fig. 4와 같이 후방로터는 고정시키고, 전방로터만 유향과 일정한 각을 이루어, 회전각도에 따른 전방로터의 성능 감소와 간섭영향을 고찰했다. 전방로터의 간섭영향을 실험적인 방법으로 관찰하기 위해 로터 RPM을 측정하였으며, 기준 RPM으로부터의 감소율 및 증가율을 계산하여 유동교란 정도를 판단하였다. 실험유속은  $0.2 \text{ m/s} \sim 1.0 \text{ m/s}$ 까지  $0.2 \text{ m/s}$ 씩 증가시키면서 비접촉 방식의 RPM 측정기를 이용하였다.

### 2.3 실험 결과

로터회전면에 수직하게 유입되는 유량을 유효유량이라 정의하고, 이는 유향의 코사인 성분이다. 유효유량은  $0^{\circ}$ 에서 최대값을 가지며, 각도가 증가함에 따라 감소하게 된다.

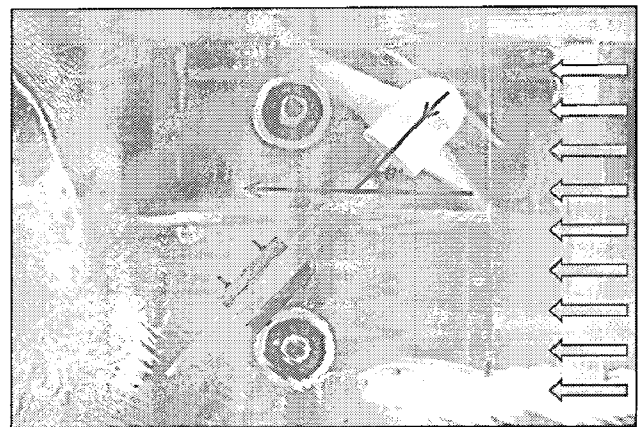


Fig. 3 Experiment arrangement

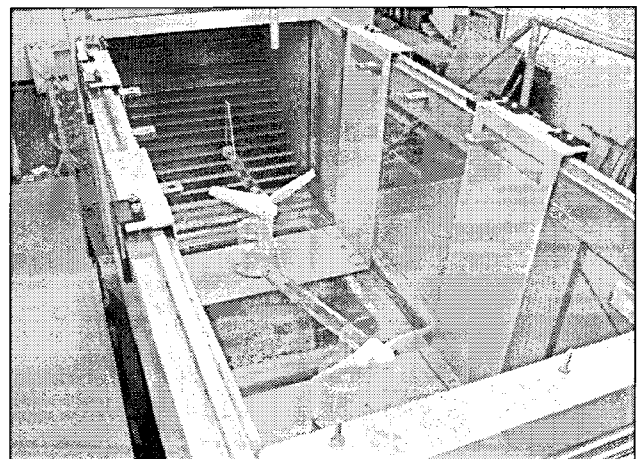


Fig. 4 Concept of experiment

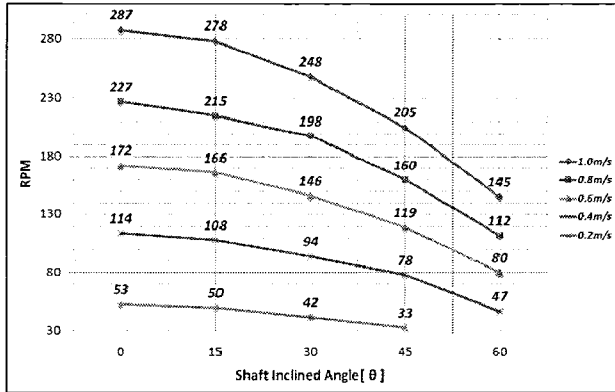


Fig. 5 RPM of rotor by shaft inclined angle

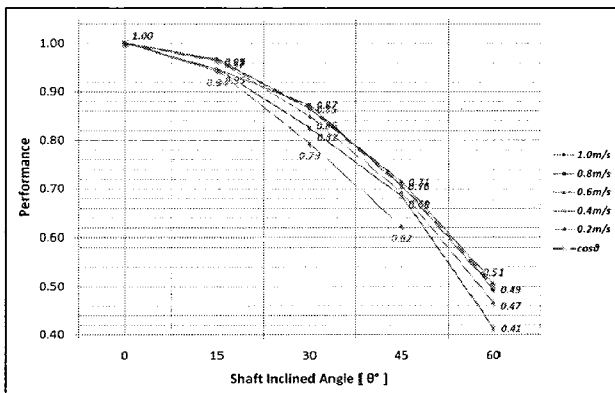


Fig. 6 Performance of rotor by shaft inclined angles

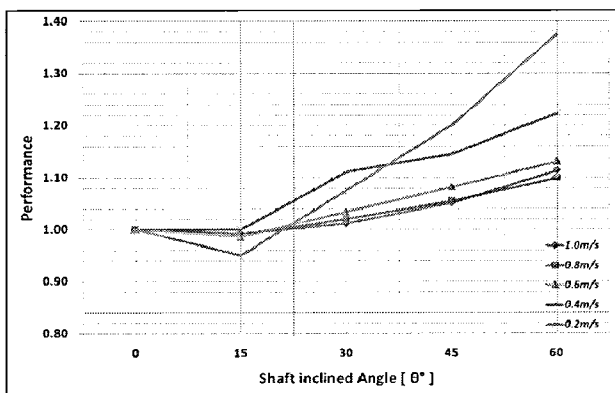


Fig. 7 Performance of rear rotor

Fig. 5는 유입각도에 따른 유속별 로터 RPM으로써 각도가 증가함에 따라 로터 RPM이 현저하게 감소함을 알 수 있다.

Fig. 6는 각도 0°에서의 RPM을 기준으로 각도의 변화에 따른 RPM 성능을 나타낸 그래프이다. 각도가 커질수록, 유속이 느릴수록 로터성능이 저하되는 경향을 나타냈다. 1.0 m/s 유속에서의 RPM 성능은 참고값인 유효유량과 거의 일치하였다. 즉 유속이 빠를수록 RPM 감소율이 이만큼에 근접하였으며, 반대로 유속이 느릴수록 유효유량에 못 미치는 RPM을 보였다. 각도가 커질수록 와류가 크게 발생하여, 유효유량에 의한 감소에 추가적인 성능감소 요인으로 작용했으며

60°에서 최대 10%의 성능감소가 발생했다.

Fig. 7은 후방에 위치한 로터의 RPM 성능을 보여준다. 전방로터의 회전각이 커질수록 후방로터의 RPM이 전체적으로 증가하는 추세를 보였다. 이는 전방로터의 RPM이 높을수록 큰 유동교란을 일으킨다는 기존 연구결과<sup>(9)</sup>를 바탕으로, 회전각 증가에 따른 전방로터 RPM 감소에 의한 현상으로 볼 수 있다. 유속이 커질수록 후방로터의 RPM 증가량이 감소하는 이유는, 전방로터의 RPM 증가에 따라 유동교란이 심화됐기 때문으로 판단된다.

### 3. 유동 해석

#### 3.1 격자 생성

본 연구에서는 ANSYS사의 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-11.0을 사용하여, 회전체인 로터 주위의 유동해석을 수행하였다. 계산격자의 생성은 적용 난류모델의 특성에 따라 원활한 수렴 및 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해 y+, 경계층 격자 밀집도, 격자 형태, 종횡비(aspect ratio) 등을 신중히 고려해야 한다. 단일 CPU에 의한 계산환경에서는 하드웨어 성능 한계를 고려하여 격자 공간해상도를 확보하여야 한다.

블레이드에서 발생하는 토크의 정확한 예측을 위해 블레이드 주변에 조밀한 prism-layer를 구성하였고, 나머지 영역은 tetra-prism 격자계로 구성하였다. 로터 격자계는 Fig. 8와 같다. 로터영역은 106,732개의 격자점과 565,874개의 요소로 구성된 비 정렬 격자이며, 로터를 둘러싸고 있는 유체영역 역시 비 정렬 격자로 25,512개의 격자점과 134,139개의 요소로 구성되어 있다.

#### 3.2 해석 조건

본 연구에서는 해석영역을 회전 도메인과 정적 도메인으로 나누어 해석하였으며 전체 유동장은 비압축성 삼차원 정상상태로 가정하였다. 회전체인 블레이드에 상대속도를 부여하기 위해, 블레이드를 둘러싸는 실린더 형태의 회전 영역을 생성하였다. CFD 해석을 위해 회전하는 로터 영역과 로터 주위의 유동영역이 Fig. 9와 같이 모델링되었다. 로터로

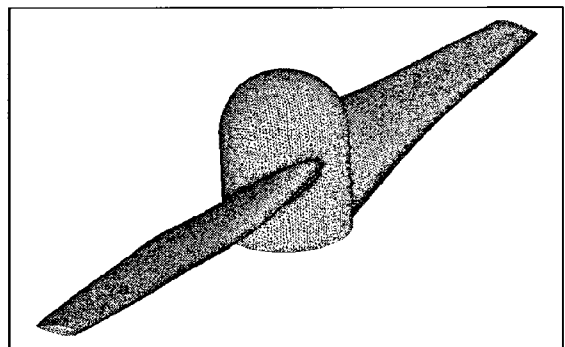


Fig. 8 Grid system of rotor

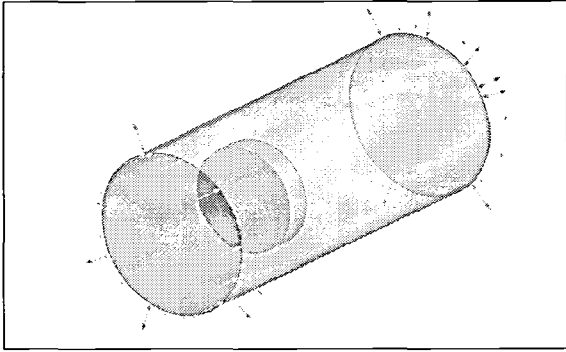


Fig. 9 Computational domain of turbine

Table 3 Conditions for numerical analysis

Working fluid	Water(isothermal, 25 °C)
Inlet	Normal speed(1 m/s)
Wall	Opening
Outlet	Opening
Turbulence model	SST
Interface area	Frozen rotor
$\alpha(^{\circ})$	4

부터 입구까지의 거리는 로터 직경의 2배, 출구까지의 거리는 4배, 외부유동영역의 직경은 내부회전영역의 3배이다. 두 영역이 접하는 면은 각각 GGI(General grid interface) 방법에 의해 인터페이스 되었다. 입구는 수직 유입 유속 조건으로 출구는 기준압력에 대해 0기압으로, 실린더 옆면은 유체가 자유롭게 드나들 수 있는 조건을 부여하였다. Table 3에 각 경계조건에 대한 사항을 기술하였다.

로터의 회전각도에 따른 효율을 고찰하기 위해, 실험과 동일하게  $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 까지 각을 변화시키며 CFD를 수행하였고, 입구 유속 조건 1.0 m/s에 대해 로터의 회전수를 변화시키면서 블레이드에 걸리는 토크를 계산하여 효율을 계산하였다. 본 해석에 사용된 난류 모델은 블레이드 주위로 발달하는 2차 유동에 대한 비교적 정확한 예측이 가능하다고 알려져 있는 SST(Shear Stress Transport)모델<sup>(10)</sup>이다. 계산은 듀얼 코어 CPU (3.0GHz\*2)로 수행되었으며, 계산 횟수는 100회 반복계산 이전에 수렴 되었다. 수렴판단 조건은 오차범위  $10^{-4}$  이하이며, 단일 케이스에 대한 계산 수행시간은 3시간 가량 소요되었다.

### 3.3 해석 결과

로터의 성능을 나타내는 가장 보편화된 방법은 주속비(tip speed ratio,  $\lambda$ )의 변화에 따라 로터효율( $C_p$ )을 나타내는 방법이다. 로터효율은 로터로 유입되는 유체가 가진 일률 중 몇%가 축 출력으로 변환되는지에 대한 수치로써, 로터의 성능을 나타내는 무차원 수이다. 주속비는 로터로 유입되는 유속과 블레이드 팁의 선속도 비로써, 유체의 블레이드 입사각

을 결정하며 로터의 회전속도를 알 수 있는 무차원 수이다. 로터효율과 주속비 정의는 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A U_{\infty}^3} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_{\infty}} \quad (2)$$

여기에서  $T[N \cdot m]$ 는 로터에 작용하는 토크,  $\omega[\text{rad/s}]$ 는 로터의 각속도,  $\rho[\text{kg/m}^3]$ 는 유체의 밀도,  $A[\text{m}^2]$ 는 로터의 유입면적( $A = \pi R^2$ ),  $R[\text{m}]$ 은 로터의 반경이며  $U_{\infty}[\text{m/s}]$ 는 유체 유입속도로써 1.0 m/s이다.

Fig. 10은 주속비에 따른 로터의 회전각도별 성능 곡선으

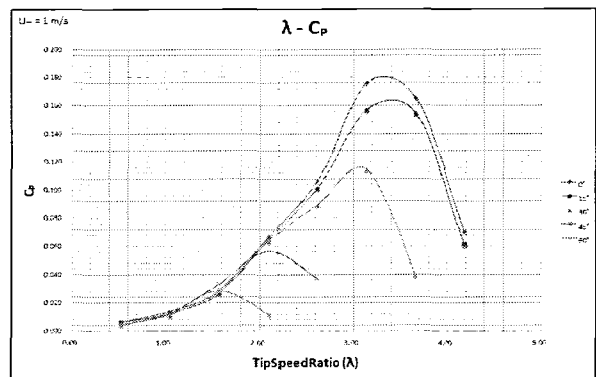


Fig. 10 Rotor performance( $C_p$ ) curve

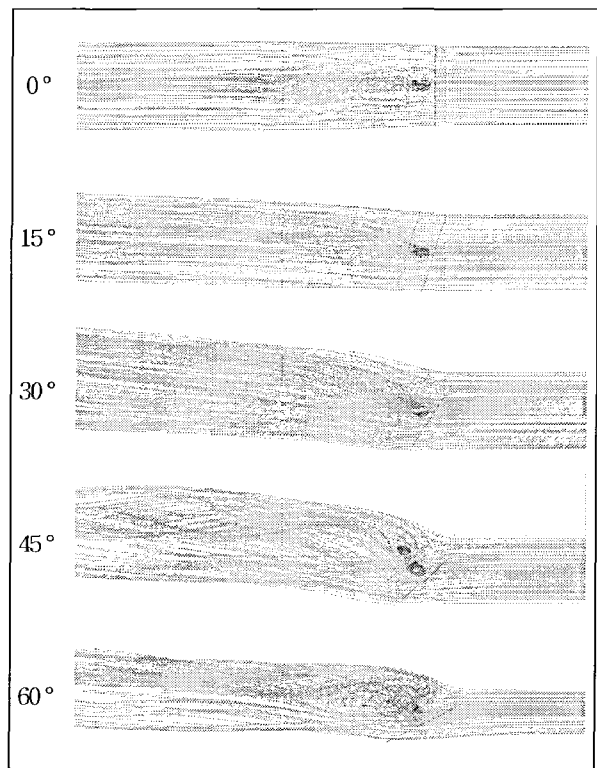


Fig. 11 Pathline around rotor

로써, 회전각이 클수록 로터의 작동범위가 작으며 효율 또한 매우 낮아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 로터회전면을 통과하는 유적선(pathline)의 분포이다.

각도가 커짐에 따라 로터 후방에서 와류가 크게 나타나며, 로터 표면을 따라 허브에서 팁 끝단으로 흐름이 형성된다. 이러한 흐름은 유체의 원활한 흐름을 방해하며, 블레이드 표면에서 강제적으로 복잡한 구조의 와류를 발생시켜 양력 손실을 초래하여 성능저하를 일으킨다. 설계 주속비와 최대 양항력을 발생시키는 받음각을 고려하여 블레이드 요소의 설치각이 결정된다. 그러므로 유체가 로터 정면에서 유입되지 못하면 블레이드가 본 능력을 발휘하지 못한다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

능동유향 장치의 연구에 앞서 유향의 변화에 따른 로터 성능변화 및 간섭에 미치는 영향을 연구하였다. 유향, 유속을 변화하여 다양한 실험과 CFD 해석을 실시하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수평축 조류발전기는 회전축과 조류 유입방향의 각도가 커짐에 따라 유효유량의 감소로 인해 성능저하가 발생하며, 유향이 회전축에 수평하도록 유향 변화에 능동적으로 대응할 수 있는 장치가 필요하다.
- 2) 각도가 커짐에 따라 와류의 발생이 크게 나타났으며, 와류의 발생은 유효유량의 감소에 따른 성능감소에 추가적인 성능감소 요인으로 작용하였다.
- 3) 같은 각도일 경우라도 유속이 느린 경우 성능 감소가 크게 나타났으며, 60°에서 최대 10%의 차이를 나타냈다.
- 4) 전방로터의 회전각이 클수록 후방로터의 RPM이 증가했으며, 전방로터의 회전속도가 회전각보다 더 큰 간섭요인으로 작용하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 및 한국해양과학기술진흥원의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Garbuglia, E., Rosa, A.D. and Berti, D., 1993, "Exploitation of Marine Current Energy," Offshore Technology Conference, pp. 509~519.
- (2) Young, R.M., 1995, "Requirements for a Tidal Power Demonstration Scheme," Journal of Power and Energy, Vol. 209, pp. 215~220.
- (3) Bernshtein, Lev B., 1995, "Tidal Power Development A Realistic, Justifiable and Topical Problem of Today," IEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, pp. 591~599.
- (4) Shiono, M., Suzuki, K. and Kiho, S., 1999, "Experiments on the Characteristics of Darrious Turbine for the Tidal Power Generation," International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 1, pp. 123~128.
- (5) Walsum, W., 1999, "Offshore Engineering for Tidal Power," International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 1, pp. 777~784.
- (6) Jo, C.H., Kim, K.S., Min, K.H., Yang, T.Y. and Lee, H.S., 2002, "Study on HAT Current Generation Rotor," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 16-1, pp. 78~82.
- (7) Jo, C.H., Par, K.K. and Im, S.W., 2007, "Interaction of Multi Arrayed Current Power Generations," International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 302~306.
- (8) Jo, C.H., Lee, K.H., Rho, Y.H. and Yim, J.Y., 2008, "Floating Tidal Current Power Application in Cooling Water Channel," The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies Conference, pp. 2184~2187.
- (9) Jo, C.H., Lee, K.H., Song, S.H. and Yim, J.Y., 2009, "Interference Effects for Various HAT Tidal Current Rotors by Experiment," The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies Conference, pp. 1791~1794.
- (10) Kim B.S., 2005, "A Study on the Optimum Blade Design and the Aerodynamic Performance Analysis for the Horizontal Axis Wind Turbines," Korea Maritime University, A thesis for a doctorate.