

200kW급 수평축 조류발전 터빈 블레이드 형상 최적설계

서지혜* · 이진학** · 박진순* · 이광수*

*한국해양과학기술원 연안공학연구본부

**한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

Optimal Design of Blade Shape for 200-kW-Class Horizontal Axis Tidal Current Turbines

JiHye Seo*, Jin-Hak Yi**, Jin-Soon Park* and Kwang-Soo Lee*

*Coastal & Environmental Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Korea

**Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology,
Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

KEY WORDS: Blade element momentum theory 블레이드 요소 운동량 이론, Genetic algorithm 유전자 알고리즘, Horizontal axis tidal current turbines 수평축 조류발전터빈, Optimal design of blade shape 블레이드 형상 최적설계, HARP_Opt 수평축 로터 성능최적화

ABSTRACT: Ocean energy is one of the most promising renewable energy resources. In particular, South Korea is one of the countries where it is economically and technically feasible to develop tidal current power plants to use tidal current energy. In this study, based on the design code for HARP_Opt (Horizontal axis rotor performance optimizer) developed by NREL (National Renewable Energy Laboratory) in the United States, and applying the BEMT (Blade element momentum theory) and GA (Genetic algorithm), the optimal shape design and performance evaluation of the horizontal axis rotor for a 200-kW-class tidal current turbine were performed using different numbers of blades (two or three) and a pitch control method (variable pitch or fixed pitch). As a result, the VSEP (Variable Speed Fixed Pitch) turbine with three blades showed the best performance. However, the performances of four different cases did not show significant differences. Hence, it is necessary when selecting the final design to consider the structural integrity related to the fatigue, along with the economic feasibility of manufacturing the blades.

1. 서 론

삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라는 잠재되어있는 풍부한 해양에너지 개발을 위해 노력을 기울여왔다. 특히 강한 흐름의 에너지를 이용하는 조류발전은 울돌목, 장죽수도, 맹골수도 등 서남해안을 중심으로 1,000MW 규모의 발전단지를 개발할 수 있을 것으로 전망되어 ‘조류에너지 실용화 기술개발(2001~2011)’ 및 ‘능동제어형 조류발전 기술개발(2011~2018)’ 등 여러 연구가 진행되고 있다(MOF, 2014). 현재 가장 앞선 해양에너지 기술을 보유하고 활발한 개발이 진행되고 있는 영국의 경우 2020년까지 조류 및 파력을 중심으로 해양에너지를 이용하여 설치용량 30-50GW와 국내 전력 소비량의 20%를 충당한다는 목표를 세우고 확고한 정책과 폭넓은 지원을 하고 있다(GOV. UK, 2013). 이에 따라 현재 1.2MW 조류발전시스템(Seagen, MCT사)이 현

장실증실험을 성공적으로 마친 상태이며 실용화 단계에 접어들 것으로 전망하고 있다.

조류발전시스템은 바람이 가지고 있는 운동에너지를 이용하는 풍력발전시스템과 유사하게 구성되며, 조류의 운동에너지를 이용하는 전체 시스템의 효율을 좌우하는 기본적인 구성 요소 중 하나가 터빈이다. 이러한 터빈은 흐름방향과 수차의 회전축 방향에 따라 수평축과 수직축 터빈(Horizontal/Vertical axis tidal current turbine)으로 나눌 수 있으며, 최근 국내에서는 수직축 조류발전 터빈에 대한 연구가 비교적 활발히 진행된 바 있다(Jung et al., 2009; Hyun et al., 2012). 수직축 터빈은 수밀 문제 및 설치, 유지관리 측면에서 수평축 터빈에 비하여 유리한 점이 있고, 또한 낮은 유속에서 작동이 용이하지만, 수평축 터빈에 비하여 용량별 무게비가 상대적으로 높고 터빈효율이 낮다는 단점이 있다. 따라서 현재 수밀문제와 설치, 유지관리 측

Received 8 June 2015, revised 25 August 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Jin-Hak Yi: +82-31-400-7811, yjih@kiost.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

면에서의 문제를 해결하여 수평축 조류터빈을 실용화하기 위한 연구가 진행되고 있다.

현재 상용으로 운영되고 있는 MW급 규모의 대형풍력터빈의 경우에는 가변속도 가변피치 방식, 즉 Variable speed variable pitch (VSVP) 제어방식과 3엽 터빈이 가장 일반적으로 적용되고 있다. 그러나 상대적으로 바람에 비해 예측 가능한 유속을 가지며, 난류 또한 영향이 적은 조류 터빈의 경우 피치제어를 하지 않고 RPM 제어만으로 전력제어를 하는 가변속도 고정피치 방식, 즉 Variable speed fixed pitch (VSFP)방식 또한 검토해볼 필요가 있다. 또한 블레이드 제작비용을 줄이기 위해 풍력터빈의 연구에서 2엽 또는 1엽 터빈에 대한 연구가 계속되고 있는 것과 같이 블레이드 개수에 따른 터빈효율, 지점부 모멘트, 추력 등을 살펴볼 필요가 있다. 참고로 영국 MCT사의 SeaGen S의 경우 실험역 실증실험에서 2엽 터빈을 적용한 바 있다. 조류발전 터빈의 성능평가와 관련된 연구는 수치 시뮬레이션에 의한 연구와 실내 혹은 실험역에서 실험을 통한 연구로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 기존 조류발전 터빈 설계의 최적화 연구 사례(Sale and Li, 2010; Yi and Sale, 2012; Bir et al., 2011; Yi et al., 2014)를 확장하여 울돌목 해역에 적용 가능한 수평축 조류터빈 형상 최적화와 관련된 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 블레이드 요소 운동량 이론(BEMT, Blade element momentum theory)

조류발전 터빈의 성능해석은 풍력터빈에서 가장 보편적으로 이용되고 있는 블레이드 요소 운동량 이론(BEMT)을 이용하였다. BEMT는 다음 Fig. 1과 같이 블레이드를 길이 방향으로 많은 수의 작은 요소로 분할하는 경우, 분할된 작은 요소는 2차원 평면상에서 거동을 하고, 또한 블레이드 길이 방향으로 요소간의 상호작용은 없다는 기본 가정 하에 개발된 방법이다 (Glauert, 1935; Moriarty and Hansen, 2005). 이때 각 요소에 작용하는 힘은 상대속도와 요소의 단면 형상에 따라 결정되는 양력과 항력에 의하여 구할 수 있고, 이와 같이 요소에 작용되

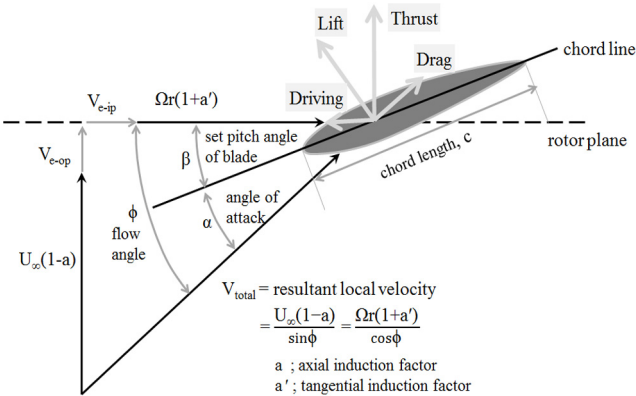


Fig. 1 Hydrofoil distribution and applied loading (Moriarty and Hansen, 2005)

는 힘을 모두 더하여 바람에 의한 힘을 결정할 수 있게 된다.

현재 터빈의 성능을 예측하기 위해 여러 가지 BEMT 기반 코드가 개발되고 있으며 그 중 WT_Perf는 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 개발한 비상용코드로 최근 까지 기업, 대학 등에서 널리 사용되고 있다(Buhl, 2004). 블레이드의 형상 및 익형(Airfoil)에 따른 양력, 항력 등 공기역학적 특성을 기본 자료로 BEMT를 이용하여 터빈의 성능을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 수평축 터빈의 블레이드형상 최적화 프로그램인 HARP_Opt (Horizontal axis rotor performance optimization)을 적용하였으며, HARP_Opt은 터빈의 성능을 평가하기 위한 해석 모듈로 WT_Perf를 적용하고 있고, 최적화방법으로는 유전자알고리즘을 적용하고 있다(Sale et al., 2009; Yi and Sale, 2012; Yi et al., 2014).

2.2 유전자 알고리즘(GA, Genetic algorithm)

유전자 알고리즘(GA)은 자연 진화(Natural evolution)와 자연 유전(Natural genetics)의 원리를 이용하여 최적화에 적용한 것으로서, 여러 개체를 동시에 이용하여 여러 탐색경로를 거쳐 최적해를 구하는 특징을 가지고 있다(Goldberg, 1989; Michalewicz, 1996). 이 때 사용되는 여러 개체의 특성 중 우수한 성질을 다음 단계에서의 개체로 전해 줌으로써 최종적으로 최적해에 도달하도록 하는 방법이다. GA에서는 흔히 이진문자열을 이용하여, 0 또는 1로 표현되는 정보를 유전자로 하며, 이러한 이진문자열 형태의 유전자 정보를 실수형으로 변환하기 위하여 십진코드(Decimal coding) 등을 이용한다. GA에서 목적함수인 적합도(Fitness value)는 WT_Perf 코드에서 얻은 연간에너지생산량(AEP, Annual energy production)을 이용한다(식 (1) 참조).

$$F(\alpha) = AEP(\alpha) = \int_{V_{in}}^{V_{out}} P_v(v;\alpha) p_w(v) dv \times 8,760 \quad (1)$$

여기서, $P_v(v;\alpha)$ 는 블레이드 설계변수 α 에 따른 유속 v 에서의 발전량, 즉 출력곡선이며, $p_w(v)$ 는 유속의 확률밀도함수이다. V_{in} 과 V_{out} 는 각각 발전 가능한 최소(Cut-in) 및 최대(Cut-out) 유속이다. 참고로 풍력터빈의 경우 태풍 등 극한조건에서의 안전성 확보를 위하여 발전시 최대풍속을 25m/s 부근으로 한정하고 있으나, 조류터빈의 경우 최대유속의 범위가 제한적이기 때문에 별도의 최대유속을 지정하지 않을 수 있다. 한편 상수 8,760(= 24×365)은 시간당 발전량을 연간발전량으로 고려하기 위한 값이다.

설계변수로는 대표적으로 나타낼 수 있는 시위길이(Chord length), 두께(Thickness), 비틀림 각도(Twisting angle), 유속별 RPM 등이 있으며, 이러한 설계변수의 상·하한값과 공동현상(Cavitation)이 발생하지 않도록 하는 조건(식 (2))을 제한식으로 적용하고 있다(Lecoffre 1999; Sale et al., 2009; Sale and Li, 2010).

$$\frac{\sigma}{SF_{cav}} + C_{Pmin} \geq 0 \text{ where } \sigma = \frac{P_{atm} + \rho gh - P_V}{1/2 \rho V_{loc}^2} \quad (2)$$

여기서, σ 는 무차원 캐비테이션수(Cavitation number)이며, C_{Pmin} 는 블레이드 표면에서의 최소 국부유압계수, SF_{cav} 는 공동 현상을 피하기 위한 안전계수를 의미한다.

3. 200kW 급 수평축 조류발전터빈의 설계

미국 에너지국(US DOE, US Department of Energy)에서는 해양에너지의 기술혁신을 위해 6가지의 기준모델(RM, Reference model)을 바탕으로 에너지균등화비용(LCOE, Levelized cost of energy)을 예측하였다(Neary et al., 2014). LCOE는 설치비용 및 운영비용 등 시스템 구축에 소요되는 총비용을 생산되는 총에너지로 나눈 값으로 경제성을 가장 잘 표현할 수 있는 값이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 RM-1과 RM-2는 흐름을 이용한 발전모델이고 RM-3은 파력발전모델이다. 이 중 RM-1 (1,100kW급 수평축 조류터빈)이 상대적으로 가장 낮은, 우수한 모델로 예측되었다 (Fig. 3). 한편 이 연구에서 다루고 있는 수평축 터빈과 동일한 RM-1의 경우, 설비이용률(CF, Capacity factor) 0.3과 정격용량 1,100kW를 고려하면 AEP는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$AEP = CF \times P_{rated} \times 8760 = 2,890,800 (kWh) \quad (3)$$

따라서 AEP와 터빈 10기를 설치할 경우의 LCOE인 \$0.41/kWh를 고려하면 총 설치비용(CAPEX, Capital expenditures)과 운영비용(OPEX, Operation expenditure)을 사용기간으로 나눈 연간비용은 대략 \$1,185,228이 된다. 그러나 이 비용은 1,100kW급 터빈의 비용이며, 터빈의 용량이 작아지게 되면 비용이 상대적으로 증가하는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 점을 고려하여 100kW, 200kW, 300kW, 400kW급 터빈의 연간 비용을 RM-1의 40%, 50%, 60% 및 70%가 된다고 가정하였다. 물론 이러한 값은 더 많은 객관적인 자료를 확보한다면 쉽게 수정 보완될 수 있다.

한편 본 연구에서 대상으로 하는 울돌목 해역 특정한 지점, 즉 울돌목시험조류발전소 재킷 구조물 안쪽에서 관측된 조류의 유속범위는 Fig. 4에서와 같이 0 ~ 3.5m/s이며, 시스템 전체의 효율을 40%로 가정할 때 출력곡선(Power curve)은 정격출력에 따라 Fig. 4(a)와 같이 구할 수 있다. 여기서 Fig. 4(b)의 유속분

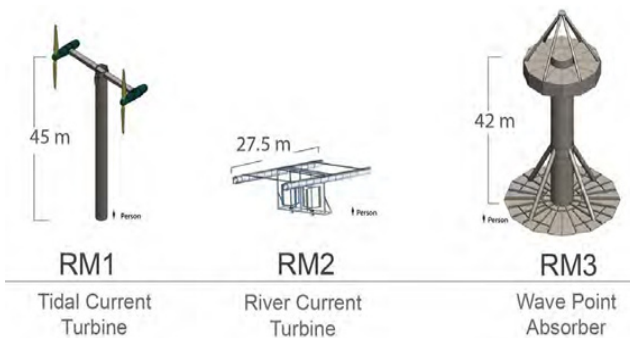


Fig. 2 RM devices paired with resource sites for technical and economic assessment (Neary et al., 2014)

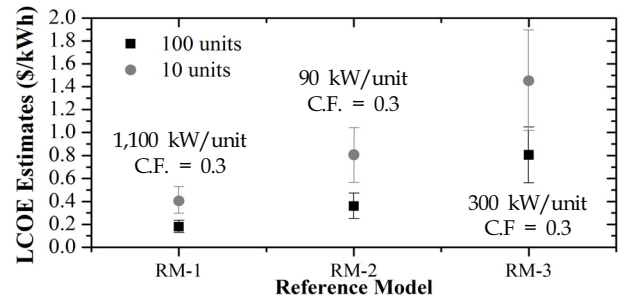
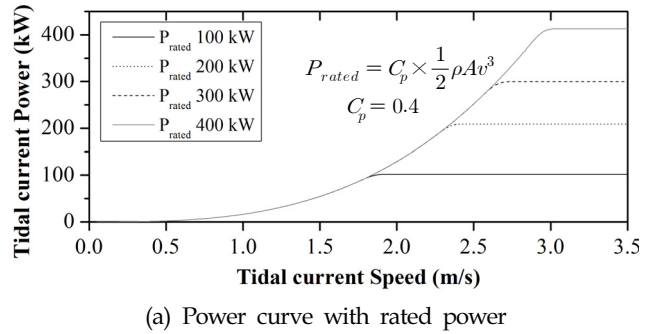
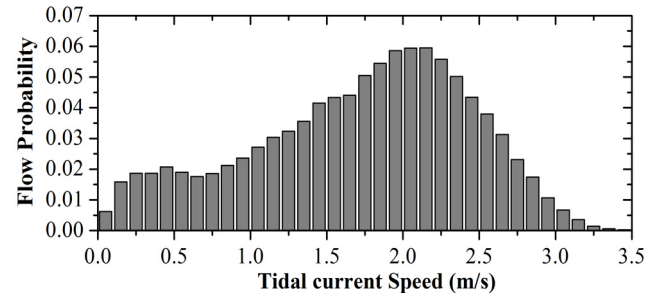


Fig. 3 LCOE estimates in \$/kWh (Neary et al., 2014)



(a) Power curve with rated power



(b) Tidal current distribution of occurrence of tidal current speed

Fig. 4 Power curves and flow distribution

포는 특정지점에서 관측한 값이고, 또한 재킷 구조물에 의한 후류의 영향이 포함된 값으로 진도대교 부근 및 협수로 가운데 위치 등에서는 더 높고 다른 형태의 유속분포를 가질 수 있다.

더불어, 유속의 발생빈도와 출력곡선으로부터 연간에너지생산량을 계산하고 이로부터 LCOE를 도출한 결과 Table 1에서와 같이 200kW급 터빈이 가장 낮은 LCOE (\$0.68/kWh)를 가지는 것으로 나타났다. 이 연구의 수평축 조류발전용 터빈 블레이드를 최적화 하는 과정에서는 증속기 및 발전기에서의 손실을 고려하여 정격출력을 220kW로 설정하여 형상을 최적화하고자 하였다. 이를 위한 기본적인 상세 설계조건은 Table 2와 같다.

Table 2에서와 같이 대상 해역의 수심은 20m로, 이에 적합한 수평축 조류터빈의 로터직경은 상·하단의 여유고(Clearance)를 5m로 고려하여 10m로 선정하였다(Fig. 5). 일반적으로, 쇄파영향 및 해상활동에 지장을 최소화하기 위해 로터의 상단여유고(Top clearance)는 최소 5m 이상을 확보하며, 해저면으로부터 전단하중과 난류의 영향을 최소화하기 위해 수심의 25% 혹은 5m 이상의 하단여유고(Bottom clearance)를 확보하는 것을 권

Table 1 Conditions for the tidal current turbine design

P_{rated}	100 kW	200 kW	300 kW	400 kW
AEP [MWh]	578.6	854.6	958.0	988.7
CF	66.06	48.78	36.45	28.22
CAPEX+OPEX [\$]	462,528	578,160	693,792	809,424
LCOE [\$]	0.80	0.68	0.72	0.82

Table 2 Conditions for the tidal current turbine design

Design parameters	Values [Unit]
P_{rated} : Rated power	220 [kW]
C_p : Estimated power coefficient	0.48
V_{rated} : Rated stream velocity	2.3 [m/s]
ρ : Sea water density	1025 [kg/m ³]
Kinematic fluid viscosity	1.06E-06 [m ² /s]
Water vapour pressure	2,500 [Pa]
Air atmospheric pressure	101,325 [Pa]
Water depth	20 [m]
D : Rotor diameter	10 [m]
N : Blade number	2 ~ 3 [EA]
Blade family	FFA

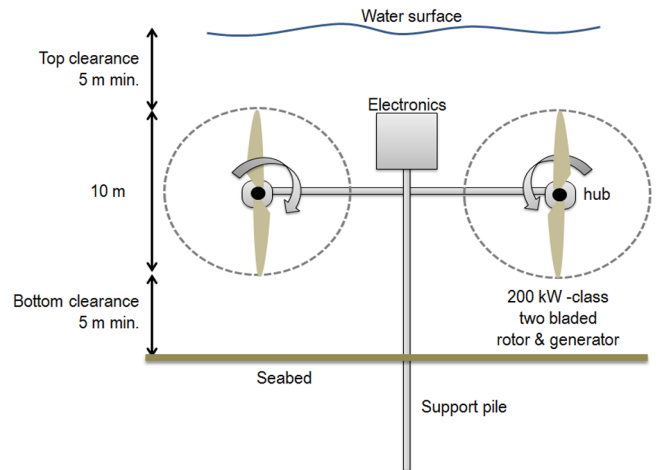


Fig. 5 Blade design parameters

장하고 있다(Legrand, 2009).

일반적으로 터빈 블레이드의 설계는 특성이 우수한 익형을 선정하여 성능계산을 통해 블레이드의 형을 결정한다. 최적 블레이드는 출력이 최대가 되는 형상을 말하며, 이는 출력계수를

최대로 하는 형상을 구하는 것이다. 최대양력계수가 실속 특성 면에서 우수한 NACA 익형도 있지만, 본 연구에서 사용된 익형은 다양한 접근각도(Angle of attack, AOA)에 대하여 항력 및 양력 계수가 알려져 있고, 조류터빈에서 중요한 공동(Cavitation) 현상에 강한 것으로 알려져 있는 FFA 계열의 FFA-W3-211, FFA-W3-241, FFA-W3-301 등이다(Trudeau, 2011; Fuglsang et al., 1998). 형상 설계와 관련해서는 블레이드 길이 방향으로의 지점부(Root)에서 끝단(Tip)까지 20등분으로 구획하여 블레이드의 비틀림 각도, 시위 길이 등을 지정하고 이들 값을 기반으로 Bezier 곡선을 이용하여 부드러운 형상을 얻을 수 있도록 하였으며(Sale and Li, 2010), 이를 위한 HARP_Opt의 GUI (Graphical user interface)화면은 Fig. 6과 같다.

Fig. 6 Initial GUI screen of HARP_Opt (Sale et al., 2009; Yi and Sale, 2012; Yi et al., 2014)

4. 로터 최적화 및 성능평가 결과

조류발전 터빈의 최적형상 도출 및 성능해석을 위한 변수는 블레이드 수에 대하여 2개(2엽/3엽), 피치제어방식에 대하여 2개(고정/가변)를 지정함으로써 총 4가지로 구성하였다.

Fig. 7은 변수에 따른 블레이드의 형상을 표시한 결과이며 횡축은 로터의 반경 대비 비율(Radial distance ratio)로 무차원화하였다. 블레이드 지점부에서 끝단으로 갈수록 선속도가 증가하기 때문에 각 위치에서 정격유속에 대한 최적 유효받음각(Optimal AOA)을 유지하기 위해 끝단으로 갈수록 비틀림각도는 감소하게 된다.

또한 지점부 부분에서는 굽힘하중, 비틀림하중, 원심하중의 3가지 하중이 동시에 작용하며, 구조적으로 이러한 하중들을 견뎌내기 위해 지점 부분에서는 끝단에 비해 상대적으로 두꺼운 형상을 유지한다.

Fig. 7(a)와 같이 비틀림 각도의 경우 변수와 상관없이 모두 유사한 결과를 보여주고 있으나, 시위 길이와 두께는 블레이드의 수에 따라 최적 형상 결과가 서로 상이함을 알 수 있다. Fig. 7(b)과 (c)에서 보이는 바와 같이 3엽에 비해 2엽의 경우 블레이드 지점부에서 끝단으로 갈수록 시위길이가 길고 두꺼운 형상을 가지나 두께비율은 큰 차이가 없다(Fig. 7(d)).

한편, Fig. 8은 흐름에 따른 블레이드 성능을 평가한 결과이다. 수중에 설치되는 조류터빈의 성능은 흐름에 대해 추력, 토크, 동력계수로서 평가될 수 있다. 먼저 로터의 추력은 수중구조물의 설계에 매우 큰 영향을 주는 인자이며, 토크는 증속기(Gear box)와 발전기 등에서의 축계 설계를 결정한다. 또한 동력은 로터에 의해서 얻어지는 에너지의 양을 결정한다. 따라서 이 세 가지의 성능을 파악하는 것은 조류터빈의 성능평가에 매

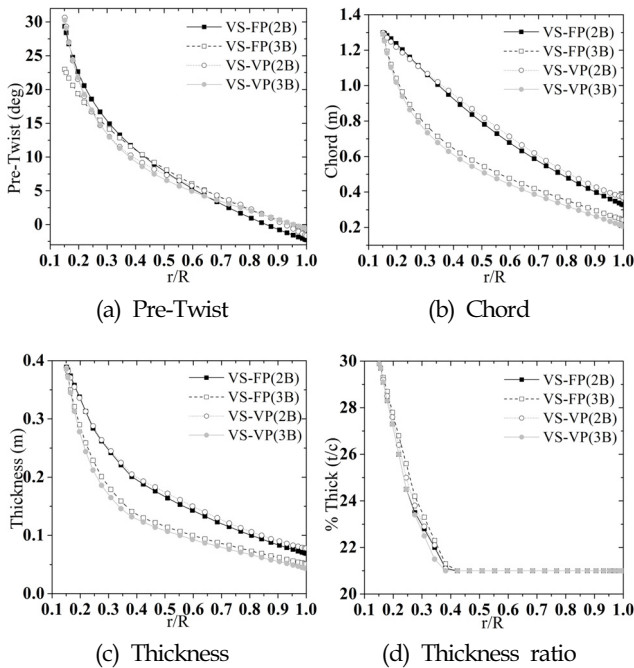
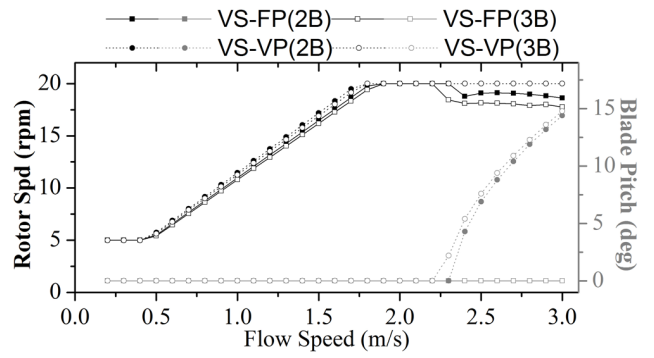
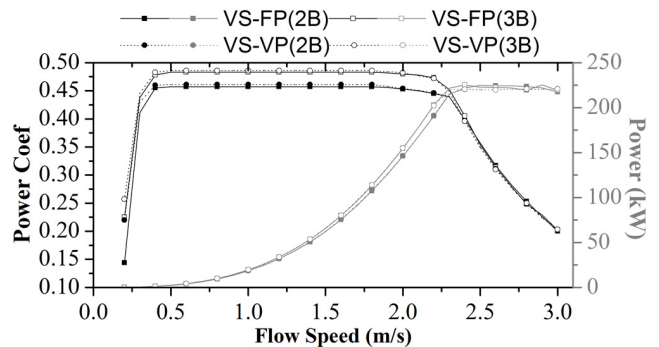


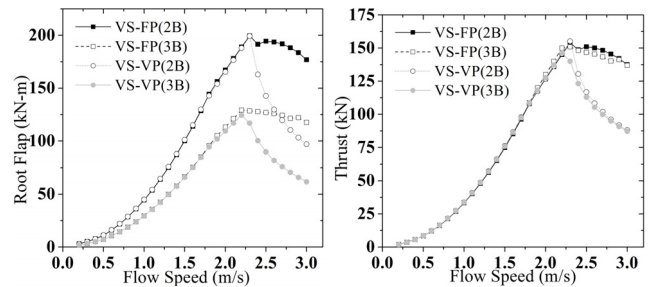
Fig. 7 Blade geometry with radial distance ratio



(a) Rotor speed & pitch angle

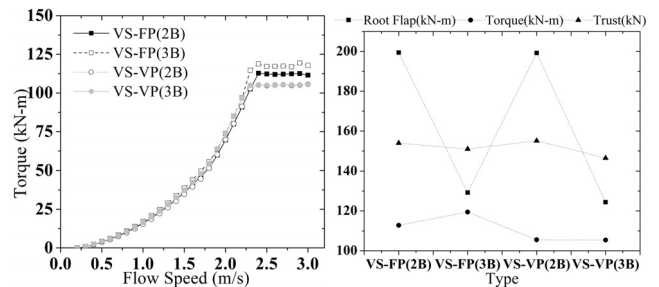


(b) Power coefficient & power



(c) Root-flap moment

(d) Thrust force



(e) Torque force

(f) Maximum forces

Fig. 8 Blade performance with flow speed

우 중요하다. Fig. 8(a)에서 알 수 있는 바와 같이 정격출력을 220kW로 고려하였을 때 유속이 대략 2.3m/s에서 정격출력이 발생하며, 이때의 최대 터빈효율은 45.7 ~ 49.0%로 최적의 정격출력을 결정할 때 가정한 터빈효율 40.0%에 비해 6~9%p 정도 더 높은 값을 보이고 있다. 또한 가변피치(●, ○)일 경우 정격 유속 이상에서는 블레이드 피치 각도를 제어함으로써 일정한

출력이 발생하도록 제어하고 있고, 고정피치(■, □)의 경우 RPM을 제어하여 정격출력을 나오게 함을 알 수 있다.

Fig. 8(b)를 살펴보면, 정격유속 이하 구간에서 터빈효율이 2엽(□, ○)에 비해 3엽(■, ●)의 경우 약 2% 가량 낮은 경향을 보이나 정격유속 이상의 구간에서는 거의 같은 값을 가진다. 정격유속 이상의 구간에서의 조류발생빈도도 상당한 값을 가지므로 블레이드 수에 의한 터빈효율의 차이와 이에 근거한 연간 에너지생산량의 차이는 미소하다고 판단된다. Fig. 8(c)와 (d)에서는 지점부부분에 가해지는 모멘트와 추력을 나타내었다. 정격유속 이상의 범위에서 고정피치(■, □)의 경우 그 값이 거의 일정하나 가변피치(●, ○)의 경우 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 터빈에 작용하는 토크 역시 고정피치일 경우 약 10% 더 크게 작용됨을 알 수 있다(Fig. 8(e)). 즉, RPM을 줄이기 때문에 토크는 커지게 된다. RPM을 줄이면 선속도와 유속의 비율(TSR, Tip speed ratio)이 변하고, 이에 따라 출력계수가 변하며 제어를 하는 원리이다.

Fig. 8(f)를 살펴보면, 지점부에 가해지는 최대모멘트가 2엽의 경우 평균 199.34kN-m로 3엽일 때 평균 126.83kN-m에 비해 크게 작용하는 것으로 보이나, 블레이드 수에 따라 터빈 전체에 가해지는 힘을 고려하면 2엽 터빈의 경우 398.68kN-m, 3엽 터빈의 경우 380.49kN-m로, 2엽 터빈이 전체적으로는 4.78% 정도 더 큰 모멘트를 받음을 알 수 있으나 큰 차이는 없다고 할 수 있다.

또한, 4가지 블레이드 형상 및 운영 조건에서의 가장 우수한 성능을 보이는 변수는 3엽의 고정피치일 경우(VS-FP/3 blades)로, 연간에너지생산량(AEP)은 최대 1,017,369kW-hr/y이며 설비이용율(CF)은 52.8%로 분석되었다. 전반적으로 2엽에 비해 3엽이 다소 더 우수한 성능을 나타내었으나, 이는 CF 측면에서 평균 1.65%, AEP 측면에서는 평균 3.28% 차이에 불과하다. 또한

피치제어방식의 경우도 가변피치에 비해 고정피치의 경우가 다소 우수한 성능을 나타내나, 이 또한 CF 측면에서 평균 0.15%, AEP 측면에서는 평균 0.32% 차이에 불과하다(Table 3). 이는 실제 블레이드 제작 시 개수에 따른 경제성을 고려한 설계가 필요함은 물론 피치제어를 도입함에 따른 장단점 등을 충분히 검토하여 RPM 제어만으로 정격유속 상에서도 전력제어를 하는 시스템의 채택도 고려할 수 있음을 의미한다. 실제 고정피치 방식을 적용할 경우, 피치제어와 관련된 여러 구성요소를 단순화할 수 있어 터빈 유지관리 측면에서는 매우 큰 장점이 있다고 할 수 있다. 한편 3엽 대신 2엽을 사용하는 경우 제작비 등이 줄어들 수 있으나 출력이나 하중 등의 변동성이 증가할 수 있으므로 이러한 측면을 충분히 검토하여 설계에 반영하여야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 울돌목 해역에 적용 가능한 조류발전용 수평축 터빈 블레이드의 최적형상 설계 및 성능평가를 목적으로 블레이드요소운동량이론을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) BEMT와 유전자 알고리즘을 이용하여 조류발전 터빈의 최적 블레이드 형상을 설계하는 일련의 절차, 즉 설계수십에 따른 로터 직경 및 정격용량을 결정하는 방법을 포함한 최적설계 과정을 제안하였다.

(2) 울돌목 해역 조류 확률밀도 분석 자료를 바탕으로 정격유속 2.3m/s에서 200kW급 조류발전용 수평축 터빈을 설계하였으며, 3엽의 VSEFP방식의 터빈이 가장 우수한 성능을 나타내었다. 그러나 4가지 변수에 따른 성능 차이가 미소한 경향을 보이므로 블레이드 개수에 따른 경제성과 제작, 설치 시의 시간과 비용, 피로도에 의한 운용 상 용이성을 고려하여 복합적인 판단이 요구된다.

Table 3 Summary of parametric study results

Control type	VS-FP (2 blades)	VS-FP (3 blades)	VS-VP (2 blades)	VS-VP (3 blades)
V_{rated} [m/s]	2.3			
AEP [kW-hr/yr]	984473	1017369	981928	1013617
CF [%]	51.1	52.8	51.0	52.6
Max Power [kW]	224.68	225.32	220.59	220.77
C_p Max [%]	45.7	48	46.1	49
$\Omega_{opt/min}$ [rpm]	18.62/5	17.76/5	20/5	20/5
Max Root Flap [kN-m]	199.44	129.23	199.23	124.42
Max Torque [kN-m]	112.81	119.47	105.52	105.41
Max Thrust [kN]	153.96	150.97	155.13	146.59

끝으로 본 연구에서 최적설계 및 성능평가를 위하여 적용한 BEMT 방법이 전산유동해석에 의한 성능평가와는 유사한 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 그러나 기본적으로 BEMT 방법은 일정한 유속을 갖는 흐름조건에서 개발된 것으로 실제 유속이 변동하는 조건에서는 효율을 실제보다 크게 평가할 수 있다. 따라서 최적설계는 BEMT를 통하여 할 수 있으나 최종적인 성능 평가에서는 실제 불균일한 유속 및 이에 따른 진동특성을 반영할 수 있도록 유체-구조물 상호작용을 고려한 전산유체역학 기반의 수치 시뮬레이션 및 현장실증실험 등을 수행하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 주요사업(PE99323)과 해양수산부와 한국해양과학기술진흥원의 “능동제어형 조류발전 기술 개발” 연구사업 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Bir, G.S., Lawson, M.J., Li, Y., 2011. Structural Design of a Horizontal-Axis Tidal Current Turbine Composite Blade. Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- Buhl, M.L. Jr., 2004. WT_PERF User's Guide. National Wind Technology Center NREL, Golden, Colorado, USA.
- Fuglsang, P., Antoniou, I., Dahl, K.S., Madsen, H.A., 1998. Wind Tunnel Tests of the FFA-W3-241, FFA-W3-301 and NACA 63-430 Airfoils. Risø-R-1041(EN), Risø National Laboratory, Roskilde.
- Glauert, H., 1935. Airplane Propellers. Division L, In Durand, W.F. (ed.), Aerodynamic Theory, 4, Springer, Berlin, 169-360.
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley: Reading, MA, USA.
- GOV. UK, 2013. Wave and Tidal Energy: Part of the UK's Energy Mix. [Online] Available at: <<https://www.gov.uk/wave-and-tidal-energy-part-of-the-uks-energy-mix>> [Accessed 1 June, 2015].
- Hyun, B.S., Choi, D.H., Han, J.S., Jin, J.Y., 2012. Performance Analysis and Design of Vertical Axis Tidal Stream Turbine. Journal of Shipping and Ocean Engineering, 2, 191-200.
- Jung, H.J., Rhee, S.H., Song, M., Hyun, B.S., 2009. A Numerical Study of Unsteady Flow around a Vertical Axis Turbine for Tidal Current Energy Conversion. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 12(1), 9-14.
- Lecoffre, Y., 1999. Cavitation Bubble Trackers. Paris: A.A. Balkema.
- Legrand, C., 2009. Assessment of Tidal Energy Resource: Marine Renewable Energy Guides. European Marine Energy Centre (EMEC).
- Michalewicz, Z., 1996. Genetic Algorithms + Data Structures Evolution Programs. Springer, New York, USA.
- Ministry of Ocean and Fisheries (MOF), 2014. Tidal Current System. [Online] Available at: <<http://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey6306&searchCategory%ED%95%B4%EC%96%91%EC%9E%90%EC%9B%90%EA%B0%9C%EB%B0%9C&boardKey46&menuKey531¤tPageNo1>> [Accessed June 2015].
- Moriarty, P.J., Hansen, A.C., 2005. AeroDyn Theory Manual. NREL Technical Report, NREL/TP-500-36881.
- Neary, V.S., Previsic, M., Jepsen, R.A., Lawson, M.J., Yu, Y.H., Copping, A.E., Fontaine, A.A., Hallett, K.C., Murray, D., 2014. Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (Mec) Technologies. Sandia National Laboratories.
- Sale, D., Jonkman, J., Musial, W., 2009. A Hydrodynamic Optimization Method and Design Code for Stall-Regulated Hydrokinetic Turbine Rotors. Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference of Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii.
- Sale, D., Li, Y., 2010. Preliminary Results from a Design Methodology and Optimization Code for Horizontal Axis Wind and Hydrokinetic Turbines. Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, Netherlands.
- Trudeau, M.G., 2011. Structural and Hydrodynamic Design Optimization Enhancements with Application to Marine Hydrokinetic Turbine Blades (Doctoral Dissertation, Pennsylvania State University).
- Yi, J.H., Sale, D., 2012. Blade Shape Optimization of Wind Turbines using Genetic Algorithms and Pattern Search Method. Journal of The Korean Society of Civil Engineers, 32(6A), 369-378.
- Yi, J.H., Yoon, G.L., Li, Y., 2014. Numerical Investigation on Effects of Rotor Control Strategy and Wind Data on Optimal Wind Turbine Blade Shape. Wind and Structures An International Journal, 18(2), 195-213.