

조류발전용 헬리컬 터빈의 특성치 분석 Analysis of Helical Turbine Characteristics for Tidal Current Power Plant

한상훈* · 이광수** · 염기대** · 박우선** · 박진순**

Sang Hun Han*, Kwang Soo Lee**, Ki Dai Yum**, Woo Sun Park** and Jin Soon Park**

요 지 : 국내에서는 조류속이 강한 곳이 다수 존재하여 조류발전 가능성이 높다. 이러한 조류발전은 유속이 빠른 곳에 터빈과 발전기를 설치하여 해수의 운동에너지로부터 전기를 생산하는 발전방식이다. 본 연구에서는 조류발전 시스템에 사용되는 헬리컬 터빈의 효율과 특성치 등을 현장실험을 바탕으로 파악하고자 하였다. 현장실험을 위하여 지름 2.2 m, 높이 2.5 m의 터빈을 제작하고, 울돌목 협수로의 한 쪽 면에 자켓구조물을 설치하여 터빈에 대한 실험을 실시하였다. 3-blade 헬리컬 터빈은 1.5 m/s와 2.1 m/s 사이의 유속에서 30 % 정도의 효율을, 6-blade 터빈은 25 % 정도의 효율을 나타내었으며, 이러한 효율은 유속의 변화에 따라 변함없이 거의 일정한 수준을 나타내었다. 3-blade 터빈의 TSR은 2.4정도인 것으로 파악되었고, 6-blade 터빈의 TSR은 1.9정도로 관찰되었다. 이러한 터빈들의 TSR은 유속이 1.5 m/s에서 2.1 m/s로 변화해도 거의 일정하게 측정되었다.

핵심용어 : 조류발전, 울돌목 협수로, 헬리컬 터빈, 효율, TSR

Abstract : The Korean peninsula has a number of coastal sites where the rhythmic rising and lowering of water surface due to tides results in strong tidal current. The kinetic energy of these currents can be efficiently exploited by use of tidal current turbines. This paper investigates the characteristics of helical turbine based on in-field test. The experimental frame was constructed at the Uldolmok narrow channel between Jindo and Haenam and installed the helical turbine of diameter 2.2 m and height 2.5 m. 3-blade turbine had the maximum efficiencies of about 30% in the current velocity range between 1.5 and 2.3 m/s and 6-blade turbine had the maximum efficiencies of about 25%. The efficiency was constant with the current velocity. TSRs of 3-blade and 6 blade turbines were observed as 2.4 and 1.9 respectively.

Keywords : Tidal power plant, Uldolmok narrow channel, helical turbine, efficiency, TSR

1. 서 론

화석연료의 고갈에 대비하고 지구환경을 지키기 위한 일환으로 청정에너지에 대한 개발이 전세계적으로 빠르게 진행되고 있다. 조류에너지는 이러한 청정에너지 중의 하나로서 국내의 지형적 여건상 매우 유망한 에너지 자원으로 고려될 수 있다(해양수산부, 2001).

조류발전은 조류 유속이 빠른 곳에 터빈과 발전기를 설치하여 해수의 운동에너지로부터 전기를 생산하는 발전방식이다. 자연적인 조류 흐름을 직접 이용한다는 점에서, 조

력담에 해수를 가뒀다가 흘러보내면서 낙차를 이용해 터빈을 돌려 전기를 생산하는 조력발전과 구분된다. 따라서 조류발전은 저수지를 확보하기 위해 댐을 막을 필요가 없고, 선박의 운항과 어류의 이동이 자유스러운 등 생태계에 영향이 적은 환경친화적인 신재생에너지 시스템이다.

최초로 제안된 무낙차 터빈은 1931년 Darrieus에 의한 것이었으나, 저 TSR에서의 낮은 효율로 인하여 실제로 사용되지는 못 하였고 그 후 다른 유형의 터빈에 대한 많은 연구가 진행되었다. 특히 이 중에서도 미국 Northeastern 대학의 A. M. Gorlov 박사에 의하여 1995년에 개발된 헬리

*한국해양연구원 연안개발에너지연구부 (Corresponding author: Sang Hun Han, Coastal Engineering & Energy Depart. KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. shhan@kordi.re.kr)

**한국해양연구원 연안개발에너지연구부 (Coastal Engineering & Energy Depart. KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

컬 터빈은 Darrieus 터빈의 부족한 self-starting 성능과 효율을 개선한 것으로 보고되었다(Gorban et al, 2001). 그러나, 헬리컬 터빈도 아직 실제 상용발전엔 적용된 사례가 없으며 터빈특성에 대한 연구자료도 매우 부족한 실정이다(Shino, 2002; 한상훈 et al, 2006).

본 연구에서는 전라남도 해남군 우수영과 진도군 녹진 사이를 잇는 협소한 해협인 울돌목에서의 상용 조류발전건설을 위한 사전연구로서 헬리컬 터빈의 특성치를 분석하고자 한다. 이를 위해 헬리컬 터빈에 대한 현장실험을 수행하고 이를 바탕으로 헬리컬 터빈의 효율과 TSR을 평가하고자 하였다.

2. 터빈 현장 실험

2.1 실험 방법

본 연구에서 사용된 터빈은 2종류이다. 하나는 일반적인 헬리컬 터빈으로서 미국 Northeastern대학의 Gorlov 박사팀이 설계와 제작한 것이다(Fig. 1(a)). 다른 하나는 해양연구원에서 특허출원한 터빈으로서 기존 외부의 3개 블레이드에 내부에도 3개의 블레이드를 추가하여 총 6개의 블레이드를 가진 터빈이다. 새롭게 고안된 터빈은 터빈의 효율 증대 및 최대토크와 최소토크사이의 편차를 줄이기 위한 목적으로 고안된 것이다. 터빈은 정적/동적 수치해석을 통해 블레이드 단면 형상, 블레이드의 두께, 축 단면적, 스포크의 위치 등을 결정하였으며, 제작된 터빈은 지름 2.2 m, 높이가 2.5 m의 크기를 가지고 축 높이의 1/4지점과 3/4지점에 두 개의 스포크를 설치하도록 하였다.

터빈이 설치된 구조물은 기존의 지름 1 m급 헬리컬 터빈용 구조물의 앞부분에 지름 2.2 m급 터빈용 케이지를 부착한 것으로 구조적인 안전성 검토를 바탕으로 장력케이블을 도입하여 구조적인 보강을 실시하였다(Fig. 2 참조).

터빈의 특성치를 계측하기 위한 시스템은 Fig. 3과 같은 구조를 고안하였는데, 최상부에서부터 Brake system, Radial bearing, Coupling, Torque & RPM meter, Slip ring, Radial bearing, Turbine, Radial bearing, Roller bearing 순으로 조립되었다. 하지만 실험의 시작과 동시에 slip ring의 부분적인 파괴가 발생하였고 비말된 해수의 침투로 slip ring의 신호전달체계에 문제가 발생하여 터빈의 변형을 값은 측정하지 못 하였다. 그러나, 토크와 RPM에 대한 데이터들은 안정적으로 취득할 수 있었다. 토크를 측정하기 위해서는 회전축에 마찰력을 가해야 하는데, 고가장비인 미세조정이 가능한 브레이크 시스템은 예산상의 문제로 설치하지 못 하



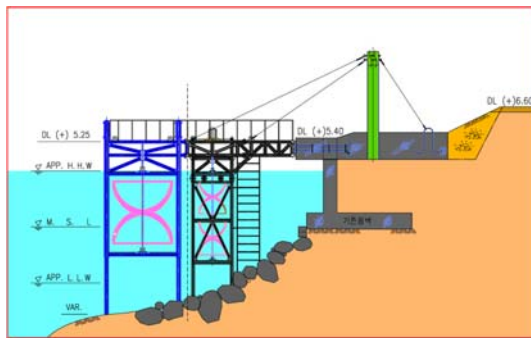
(a) 3-blade Turbine



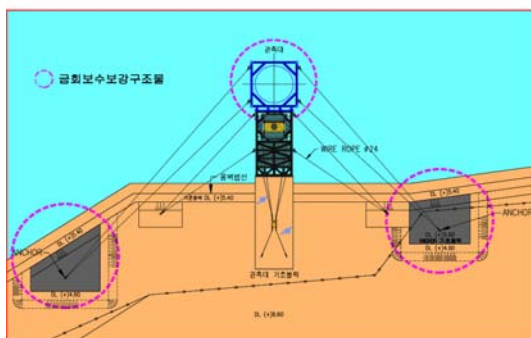
(b) 6-blade Turbine

Fig. 1. Helical Turbine.

었다. 대신에 유압식 브레이크 시스템을 설치하여 주기적으로 인력에 의해서 마찰력이 가해지도록 하였다. 토크와 RPM은 일본 MINEBEA 사의 TMNR형식의 기기를 사용하여 계측을 수행하였다. 사용된 기기는 최대 10 kNm의 토크와 4000RPM의 회전수를 측정할 수 있는 것으로 본 연구에 큰 무리없이 적용될 수 있는 기기이다. 데이터로거는 HBM사의 MGCPPlus를 이용하였는데, 토크와 RPM 모두 초당 50개의 데이터를 획득하여 유속변화에 따른 토크와 RPM 변화를 계측하고자 하였다. 유속은 노르웨이 NORTEK



(a) Side view



(b) Plane view

Fig. 2. In-situ test structure.

사의 유속계를 이용하여 측정하였다.

2.2 실험 결과

유압식 브레이크를 이용하여 회전축에 마찰력을 가하면 회전하던 터빈의 RPM은 줄어들고 0이었던 토크값이 상승하게 된다. 마찰력을 일정시간동안 주면 Fig. 4 및 5와 같

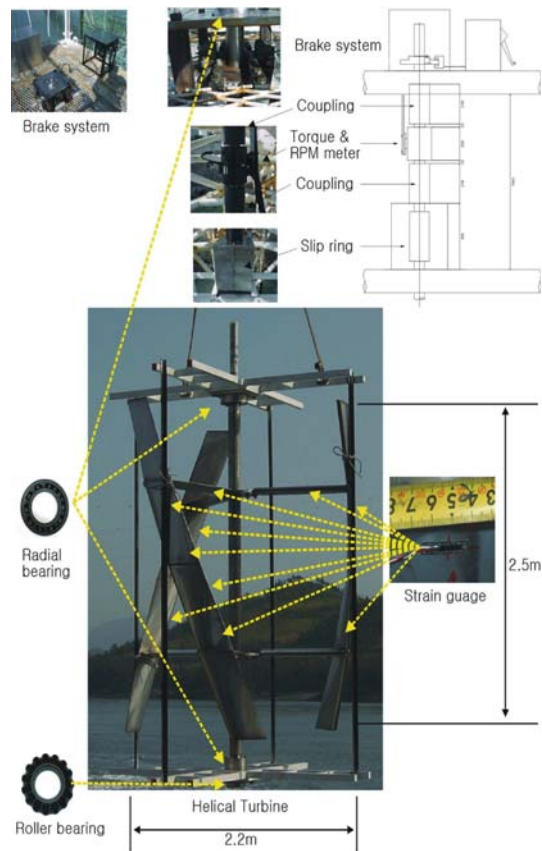
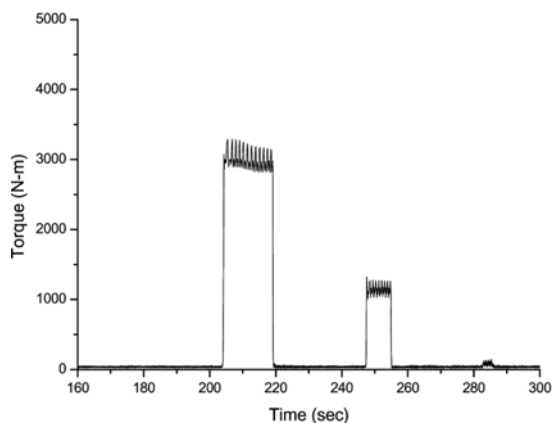
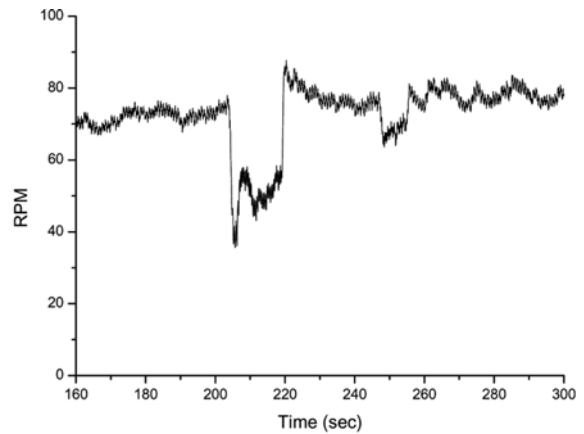


Fig. 3. In-situ experimental system.

이 일정한 토크와 RPM이 유지되다가 다시 마찰력을 제거하면 토크는 0으로 RPM은 마찰력이 없는 상태의 회전수로 돌아간다. 그림에 나타난 바와 같이 마찰력이 가해지는



(a) Torque



(b) RPM

Fig. 4. Torque and RPM of 3-blade turbine (Current Velocity = 2.4 m/s).

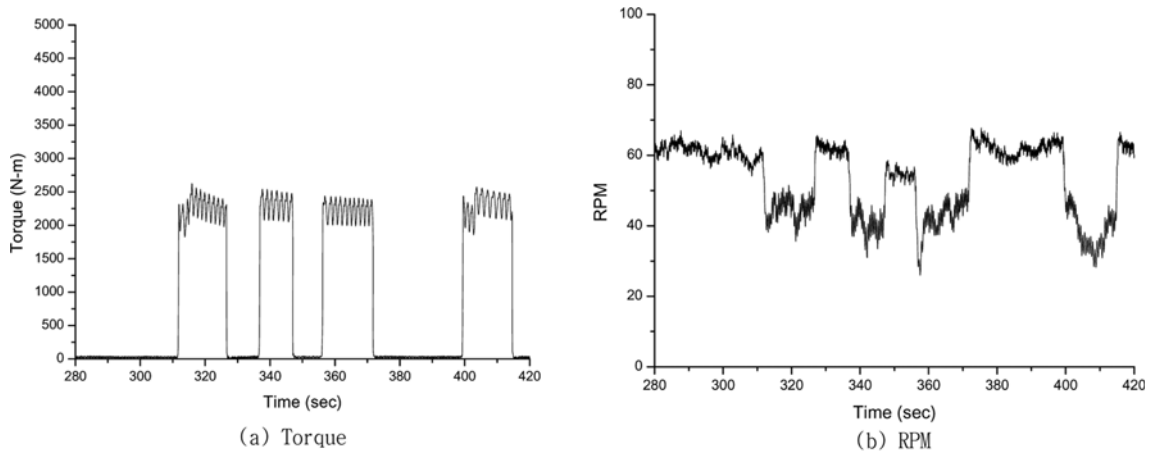


Fig. 5. Torque and RPM of 6-blade turbine (Current Velocity = 2.5 m/s).

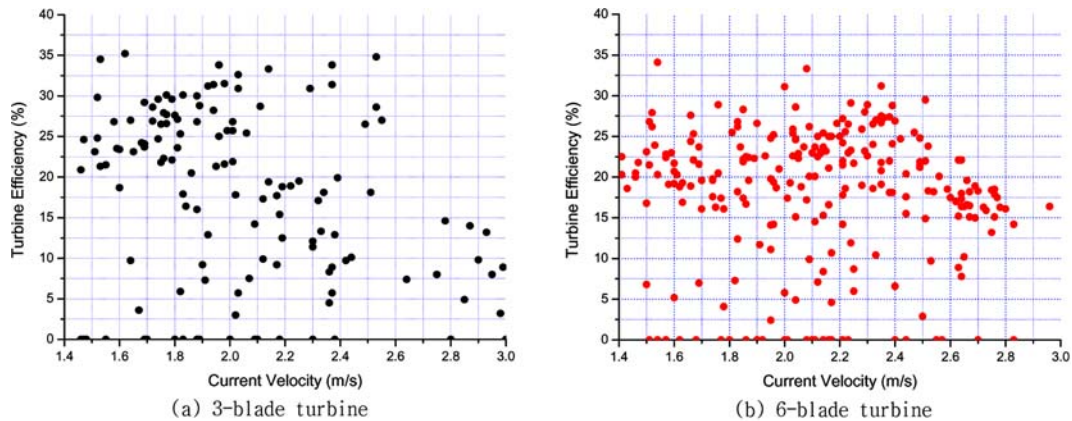


Fig. 6. Turbine efficiency with current velocity.

시간동안 토크보다는 RPM의 변동성이 크다. 이러한 변동성의 영향을 줄이기 위해 토크 및 RPM의 평균값을 이용하여 터빈의 특성치를 분석하였다.

터빈의 토크와 RPM이 계산되면 생산되는 전력은 토크와 RPM의 곱으로 산출된다. 이러한 생성된 전력을 이론적인 최대전력생산가능량으로 나누면 터빈의 효율을 구할 수 있다. 식 (1)은 터빈효율을 나타내고 있다.

$$\eta = \frac{T_r \cdot RPM}{\frac{1}{2} \rho V^3 A} \quad (1)$$

여기서, η 는 터빈효율, T_r 는 터빈생성토크, ρ 는 물의 밀도, V 는 유속, A 는 통수단면적이다.

이러한 계산을 바탕으로 Fig. 6은 유속에 따른 터빈들의 효율을 나타내고 있다. 유속이 2.4 m/s 이상인 경우에는 터빈이 완전히 물속에 잠기지 않았다. 창조시에 고유속이 구

현되는 현장여건상 창조시에 실험을 하게 되는데, 터빈설치 위치의 수심, 가설 프레임의 안전성, 유지관리의 유용성을 고려한 터빈 설치 위치가 2.4 m/s의 유속에서 터빈이 완전히 잠기지 않는 높이였기 때문이다. 이러한 문제는 피어롯트 플랜트에서는 해결될 것으로 사료된다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 터빈의 성능이 유속 2.4 m/s 이상에서는 완전히 발휘되지 않아 효율이 저하되고 있음을 관찰할 수 있다. 유속 2.4 m/s 이하의 데이터를 분석하면, 3-blade 터빈의 경우에는 30-35% 수준의 효율을 상한계값으로 추정할 수 있고, 6-blade 터빈의 경우에는 25-30%를 효율의 상한계값으로 고려할 수 있다. 일반적으로 알려진 헬리컬 터빈의 효율 25%정도보다는 조금 큰 값이 관찰되었음을 알 수 있다(Verdant power, 2005). 따라서, 3-blade 헬리컬 터빈의 효율을 30%로 고려하여 터빈을 설계하는 것은 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

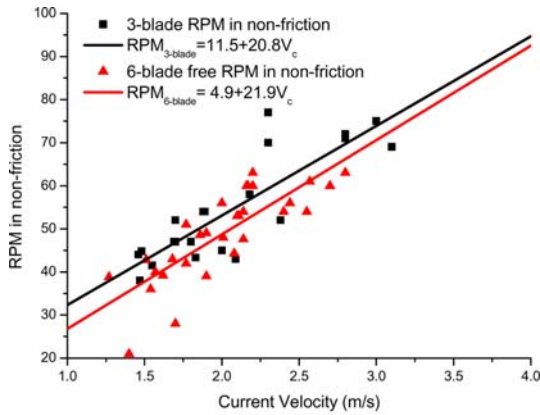


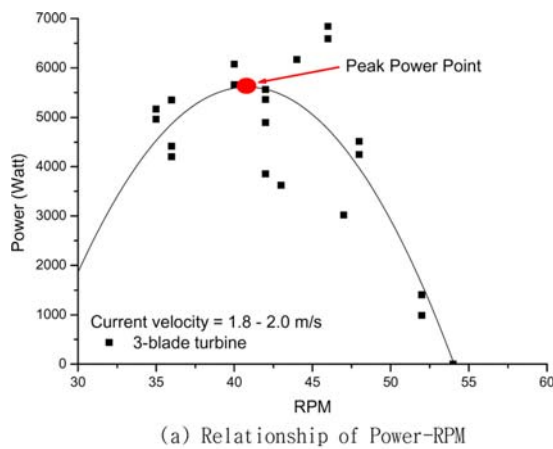
Fig. 7. RPM in non-friction.

Fig. 7은 마찰력이 없는 상태의 터빈들의 유속에 따른 RPM 변화를 고찰해 보았다. 그림에 나타난 바와 같이 1.5-3.0 m/s의 유속구간에서 대체로 3-blade의 터빈이 6-blade의 터빈보다 RPM 값이 5정도 큰 것을 관찰할 수 있다. 이것은 블레이드의 추가에 따른 터빈 무게의 증가와 터빈의 유속방향 저항성이 증가된 것이 원인으로 판단된다.

3. 터빈 특성치 분석

3.1 최대전력지점에서의 효율

터빈의 효율을 유속에 따라 좀 더 세밀하게 평가하기 위해서는 유속별 터빈의 전력과 RPM과의 상관관계를 도시하고 이러한 관계에서 최대전력지점(Peak Power Point, PPP)를 도출할 필요가 있다(Verdant power, 2005). Fig. 8(a)는 유속이 1.8에서 2.0 m/s에 있을 때의 데이터들을 도시



(a) Relationship of Power-RPM

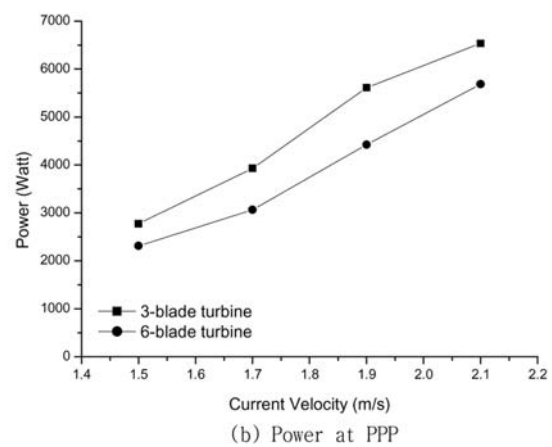
Table 1. Turbine efficiency at peak power points

Velocity(m/s)	1.5	1.7	1.9	2.1	average
Type					
3-blade turbine	29.9 %	29.1 %	29.8 %	25.7 %	28.6 %
6-blade turbine	24.9 %	22.7 %	23.5 %	22.4 %	23.4 %

하고 이러한 데이터를 바탕으로 회귀분석을 통해 최대전력 지점을 도시한 것이다. 1분이내의 시간동안에도 유속이 10% 정도 변화하므로 이를 고려하여 속도범위를 선정하고 이 범위에 포함되는 데이터들을 이용하여 전력과 RPM과의 상관관계를 구하였다. 유속 1.5, 1.7, 1.9, 2.1 m/s에서 최대전력지점의 효율을 구하고 이를 도시한 것이 Fig. 8(b)이다. 3-blade 터빈의 경우는 유속 1.5에서 1.9 m/s 사이인 경우는 효율이 29-30%였고, 2.1 m/s인 경우는 26%였다. 6-blade 터빈의 경우는 유속이 1.5 m/s인 경우는 효율이 25%였고, 나머지 유속에서는 23-24%의 효율을 나타내었다. 그리고, 3-blade 터빈과 6-blade 터빈의 4가지 유속에 대한 평균효율은 각각 29%와 24%였다. 이것은 Fig. 6에서의 결과와 거의 유사한 효율을 나타내고 있으며 터빈의 종류에 따른 효율이 5%정도 차이가 있음을 재확인할 수 있다.

3.2 최적 TSR

터빈의 고유특성치 중의 하나가 유속과 터빈의 속도비로 나타낸 TSR(Tip Speed Ratio)이다. Fig. 9는 모든 현장실험데이터들을 이용하여 TSR과 터빈효율의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 9와 같이 최대터빈효율에서 3-blade 터빈의 TSR은 2.5정도로 추정되고, 6-blade 터빈은 2.0정도로 관찰됨을 알 수 있다. 앞서 고려한 최대전력지점(Peak



(b) Power at PPP

Fig. 8. Peak Power Point.

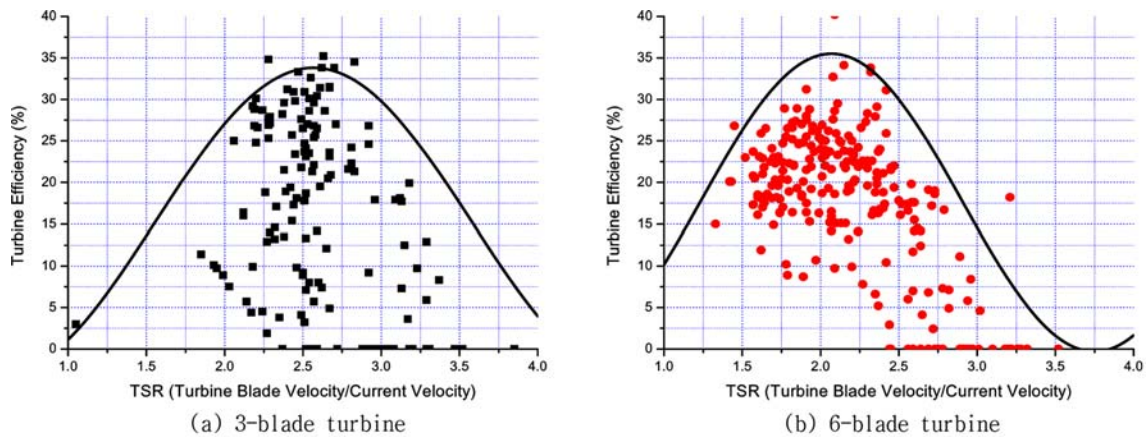


Fig. 9. TSR with current velocity.

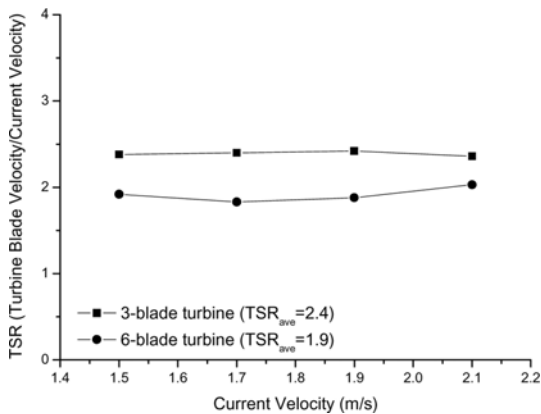


Fig. 10. TSR at PPP.

Power Point)에서도 TSR을 구할 수 있는데, Fig. 10은 유속에 따른 Peak Power Point에서의 TSR을 나타내고 있다. 3-blade 터빈의 경우에는 4가지의 유속범위에서의 TSR 평균값이 2.4이고 6-blade 터빈의 경우는 1.9정도였다. Fig. 7에 나타난 바 같이 3-blade 터빈이 6-blade 터빈보다 무부하시의 RPM이 크다. 따라서, 최대효율에서의 RPM 값도 3-blade 터빈이 6-blade 터빈보다 크므로 터빈의 고유특성치인 TSR도 3-blade 터빈이 6-blade 터빈보다 크게 관찰되었다.

기존 연구자들이 제시하고 있는 3-blade 헬리컬 터빈의 TSR은 2.0에서 2.5사이이다(Verdant power, 2005). 본 연구에서 제시된 3-blade 터빈의 TSR 2.4는 기존 연구자들의 결과와 유사한 값을 나타낸다고 볼 수 있다. 특히, 기존의 연구자들의 결과들이 1.5 m/s 이하의 유속에 대해서만 실험이 수행된 것인데 반해, 본 연구는 유속 1.5에서 2.1 m/s 정

도의 영역에서 실험과 분석을 수행한 것으로 고유속 조류발전 시의 중요한 자료로 사용될 수 있다. 또한, 기존 연구(Verdant power, 2005)에서 유속에 따라 TSR이 조금씩 변화하는 경향이 관측되기도 하였는데, 본 연구결과에서는 이러한 경향성을 관측할 수 없었다. 이 부분에 대해서는 향후 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

3.3 파이롯트 플랜트 터빈 설계

본 연구의 현장실험은 울돌목의 해남 육측면에 설치된 자켓구조물에서 수행한 것으로 앞에서 언급한 바와 같이 주로 유속 2.3 m/s 이하의 실험결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 실제 울돌목에 조류발전 실구조물이 건설된다면 정격유속 4.8 m/s 정도에서 발전이 이루어질 것으로 관측된다. 즉, 현재 현장실험 결과를 실제 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 따라서, 울돌목에서의 조류발전 사전단계로 파이롯트 플랜트를 설치하여 실제 조류발전시의 문제점을 사전에 검토하도록 계획되어있다. 이에 본 연구에서의 결과를 이용하여 파이롯트 플랜트에 사용되는 터빈을 설계하였다.

본 연구결과와 기존의 연구결과를 종합해 본다면 3-blade 헬리컬 터빈의 효율은 30% 내외로 판단된다. 현재 파이롯트 플랜트에서 사용이 예정되어 있는 발전기는 한 축에서 500 kW의 전력이 생산되는 것으로 가정하고 있다. 이러한 경우 터빈축에서의 발전 손실율을 감안하여 터빈에서는 550 kW 정도의 전력이 생산되는 토크와 RPM 필요하다. 또한, 울돌목에서의 발전시 정격유속을 4.8 m/s로 고려하고 있다. 이러한 데이터를 종합하고 식 (1)을 이용하면 전력발생을 위한 필요통수단면적을 구할 수 있으며 그 값은 32.4 m²이

다. 따라서, 터빈의 지름 3 m라면 높이가 3.6 m인 터빈 3개를 설치하면 필요한 전력을 생산할 수 있다. 또한, 3-blade 터빈의 TSR이 2.4이므로 최대효율 발생 시의 RPM은 73정도로 계산된다. 6-blade 터빈은 현재 연구에서는 효율이 낮은 것으로 관측되었지만 고유속에서의 특성치를 파악하기 위해 3-blade 터빈과 같은 크기를 가진 형태로 실험을 수행할 예정이며 이 때의 최대효율 발생시의 RPM은 58정도로 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 울돌목 조류발전 시스템에 적용을 위해 헬리컬 터빈에 대한 실험을 현장에서 수행하고 이를 분석한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1.5 m/s에서 2.1 m/s 사이의 유속에서 3-blade 터빈은 30 %정도의 효율을, 6-blade 터빈은 25 %정도의 효율을 나타내었다. 이러한 효율은 유속의 변화에 따라 변함없이 거의 일정한 수준을 나타내었다.

2. 마찰이 없는 상태의 터빈의 RPM은 3-blade 터빈이 6-blade 터빈보다 유속에 따라 5 RPM 정도 높은 것으로 관찰되었는데, 이러한 영향으로 3-blade 터빈의 TSR은 2.4정도인 것으로 파악되었고, 6-blade 터빈의 TSR은 1.9정도로 관찰되었다. 이러한 터빈들의 TSR은 유속이 1.5 m/s에서 2.1 m/s로 변화해도 거의 일정하였다.

3. 500 kW의 전력을 생산하기 위한 터빈을 현재 연구결과를 바탕으로 설계한다면 지름 3.0 m×높이 3.6 m 터빈 3개를 설치하는 것이 적당한 것으로 계산되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 조류에너지 실용화기술개발사업 (PM54840)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 해양수산부 (2001). 해양에너지 실용화 기술개발(II).
 한상훈, 이광수, 염기대, 박우선, 박진순, 이진학 (2006). 현장계측에 의한 조류 발전용수차의 효율 평가. 한국신재생에너지학회 춘계학술발표회 논문집, 517-520.
 Gorban, A.N., Gorlov, A.M. and Silantyev, V.M. (2001). Limits of the turbine efficiency for free fluid flow. *J. Ene. Res. Tech.*, 123, 311-317.
 Shino, M., Suzuki, K. and Kiho S. (2002). Output characteristics of darrieus water turbine with helical blades for tidal current generations. *Proceedings of 12th Intl. Conf. of Off-shore & Polar Engineering*, Kitakyushu, Japan, 859-864.
 Verdant Power (2005). Integration of the gorlove helical turbine into an optimized hardware/software system platform, Amesbury tidal energy project.

원고접수일: 2009년 6월 16일

수정본채택: 2009년 7월 9일

게재확정일: 2009년 7월 30일