

조류 발전용 헬리컬 수차의 효율에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Helical Turbine Efficiency for Tidal Current Power Plant

한상훈* , 이광수** , 염기대*** , 박우선**** , 박진순***** , 이진학*****

Sang Hun Han, Kwang Soo Lee, Ki Dai Yum, Woo Sun Park, Jin Soon Park, Jin Hak Yi

요 지

조류발전은 조류 유속이 빠른 곳에 수차발전기를 설치하여 해수의 운동에너지로부터 전기를 생산하는 발전방식이다. 2001년부터 해양연구원에서는 울돌목의 우수한 조류발전 개발 여건을 바탕으로 조류에너지 실용화 기술을 개발하고 있다. 본 연구에서는 조류발전 시스템에 사용되는 헬리컬 수차의 효율을 현장실험을 바탕으로 판단하고자 하였다. 현장실험을 위하여 지름 2.2 m, 높이 2.5 m의 수차를 제작하고, 울돌목 협수로의 한 쪽 면에 자켓구조물을 설치하여 수차를 거치한다. 수차가 회전함에 따라 회전봉에 일정 마찰을 주어 토크와 RPM을 측정하고, 함께 측정된 유속 자료를 이용하여 수차의 효율을 산정한다. 유속-수차효율, TSR(수차의 날개속도와 유속의 비)-수차효율의 상관관계로 실험결과를 고찰하였다. 1중 날개 수차인 경우에 유속 1.4에서 2.6 m/s 사이에서 최대효율이 30 - 35 % 정도였고, 2중 날개 수차에 대한 실험에서는 유속 1.4에서 2.6 m/s 사이에서 최대수차효율이 25 - 35 % 사이임을 알 수 있었다. TSR과 최대수차효율의 상관관계는 실험 case별로 조금씩 다르다. 전체적으로 1중 날개의 경우가 최대수차효율에서 2중 날개보다 TSR 값이 조금 큰 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 1중 날개가 2중 날개보다 가벼워 좀 더 큰 RPM을 발생시켜서 나타난 현상으로 생각된다. 현재의 실험결과들을 이용하여 TSR과 최대수차효율을 상관관계를 나타내는 모델식을 도출하였다. 현장시험결과를 종합하면, 현장조류발전 시설이 최소 600 kW의 전력이 생산되기 위해서는 지름 3 m, 높이 3.6 m 인 수차 3개가 하나의 축에 설치되어야 하는 것으로 계산되었다. 정격유속이 4.8 m/s이고 수차의 지름이 3m 라면, 최적 전력발생시의 RPM은 1중 날개의 경우 79이고 2중 날개의 경우는 63정도임을 추정할 수 있었다.

핵심용어 : 조류발전, 울돌목 협수로, 수차, 효율

1. 서 론

조류발전은 조류 유속이 빠른 곳에 수차발전기를 설치하여 해수의 운동에너지로부터 전기를 생산하는 발전방식이다. 2001년부터 해양연구원에서는 울돌목의 우수한 조류발전 개발 여건을 바탕으로 조류에너지 실용화 기술을 개발하고 있다.

조류 발전을 위해서는 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하기 위한 발전수차가 필요하다. 최초로

* 정회원 · 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원 · E-mail : shhan@kordi.re.kr
** 정회원 · 한국해양연구원 연안개발연구본부 본부장 · E-mail : kslee@kordi.re.kr
*** 정회원 · 한국해양연구원 원장 · E-mail : kdyum@kordi.re.kr
**** 정회원 · 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원 · E-mail : wspark@kordi.re.kr
***** 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임기술원 · E-mail : jpark@kordi.re.kr
***** 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원 · E-mail : jhyi@kordi.re.kr

제안된 무낙차 수차는 1931년 Darrieus에 의한 것이었으나, 낮은 효율로 인하여 실제로 사용되지는 못하였고 그 후 이러한 수차의 개선을 위해 많은 연구가 진행되었다. 특히 이 중에서도 1994년 미국 Northeastern 대학의 A. M. Gorlov 박사에 의하여 1995년에 개발된 헬리컬 수차는 Darrieus 수차의 장점만을 취하여 Darrieus 수차에 비하여 50%이상 효율이 개선된 것으로 평가되고 있다.

본 연구에서는 조류발전 시스템에 대한 적용을 목적으로 헬리컬 수차에 대한 현장실험을 수행하고 이를 바탕으로 헬리컬 수차의 효율을 평가하고자 하였다.

2. 현장실험

실내수리실험에서 여러 수차형상에 대한 특성을 파악하였지만, 그 결과값이 이론적인 값과는 큰 차이를 보여 현장실험을 통해 개발된 수차의 성능을 검증하고자 하였다.

2.1 실험방법

초기에 제작된 1중 날개 수차는 미국의 Northeastern 대학에서 구조해석과 제작을 진행하였고, 그 이후에 제작된 2중 날개 수차는 해양연구원에서는 제작하였다. 수차는 구조해석 후에 합리적인 단면두께와 구조형태를 선정하고 수차의 각 부분인 날개, 축, 스포크를 별도로 제작하여 조립하였다. 제작된 수차의 크기는 지름 2.2 m, 높이 2.5 m로 날개에 작용하는 하중의 크기를 줄이기 위해서 날개의 1/4지점과 3/4지점에 두 개의 스포크를 설치하였다.

현장계측 구조물은 최상부에서부터 Brake system, Radial bearing, Coupling, Torque & RPM meter, Slip ring, Radial bearing, Turbine, Radial bearing, Roller bearing 순으로 설치된다(Fig. 1). 이 중에서 slip ring은 수차의 변형률을 측정하기 위해서 설치되었다. 그러나, 실험의 시작과 동시에 slip ring이 파괴가 일어나서 변형률 데이터는 얻을 수 없었다.

지름 2.2 m 수차는 기존의 지름 1.1m 수차의 앞쪽에 자켓구조물을 가설하여 설치하였다. 자켓 구조물 전체에 하중이 증가함에 따라 장력케이블을 보강하여 구조물의 안전성과 사용성을 제고하였다(Fig. 2).

현장실험에서는 1중 날개(Fig. 1)와 2중 날개에 대한 실험을 수행하여 사전에 수행한 수리실험에서의 수차 특성을 현장에서도 파악하고자 하였다. 2중 날개는 날개가 축 주변에 각각 하나씩 더 들어 있어 날개의 수가 6개인 수차다.

유속은 노르웨이 Nortek 사의 유속계를 이용하여 측정하였다. 현장측정에서는 수차효율을 위해 토크와 회전수를 측정하는 것이 필요하다. 이를 위해서 토크와 rpm 미터가 필요한데, 일본 MINEBEA 사의 TMNR형식의 기기를 사용하여 계측을 수행하였다. 사용된 기기는 최대 10 k N·m의 토크와 4000 rpm의 회전수를 측정할 수 있는 것이다. 데이터로거는 HBM사의 MGCPlus를 이용하였었고, 토크와 rpm 모두 초당 50개의 데이터를 획득하여 유속변화에 따른 토크와 rpm변화를 모델링하고자 하였다.

2.2 실험결과

현장실험의 적지 않은 경우에서 페타이어, 말목, 냉장고 등 중대형 부유폐기물에 의한 수차 파괴가 발생하여 온전한 데이터를 얻었을 수 없었다. 또한, 2004년도의 실험의 경우에는

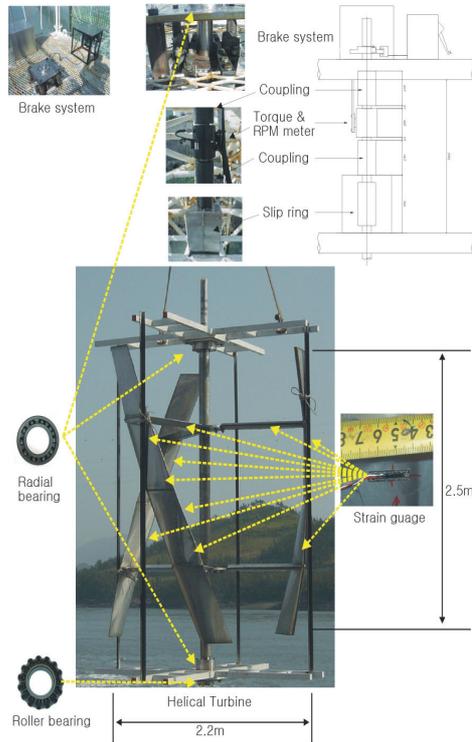
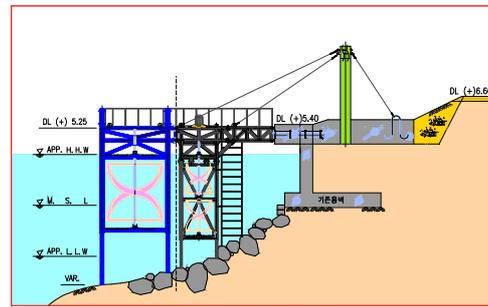
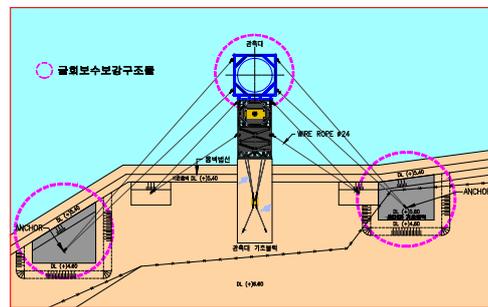


Fig. 1 In-situation experimental system and turbine



(a) Side view



(b) Plane view

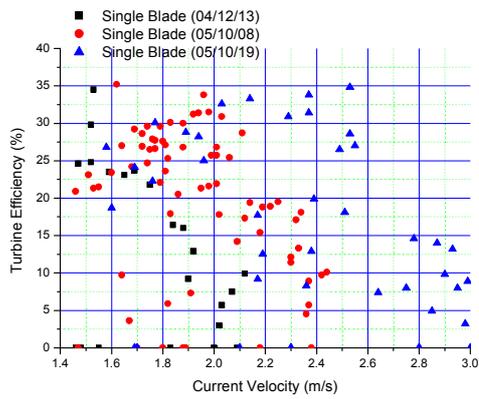
Fig. 2 In-situation test structure

수차의 위치가 높아 수차가 완전히 잠겼을 경우에 유속의 크기가 매우 작았다. 따라서, 이러한 제한 조건들을 고려하여 2004년도에 실험한 1중과 2중 날개의 결과 중 각 1종류, 2005년에 실험한 1중 날개 결과 2종류, 2중 날개 결과 3종류 등의 실험결과들을 분석하였다.

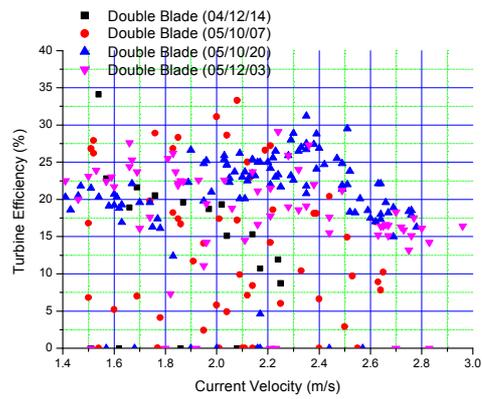
앞에서 설명한 바와 같이 회전봉에 일정 마찰을 주어 토크와 RPM을 조정하고 이것을 바탕으로 수차효율을 산정한다. 토크값이 특정시간동안 일정한 값을 나타내는데 이 값들을 평균하고 같은 시간동안의 RPM 값을 평균하여 그 순간의 수차효율을 계산한다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각의 실험결과를 유속-수차효율, TSR(수차의 날개속도와 유속의 비)-수차효율로 나타낸 것이다. 대부분의 실험결과에서 고유속의 영역에서 수차효율이 조금 작게 나타난다. 이것은 수차가 물속에 충분히 잠기기 않아서 나타난 현상으로 생각된다. 외형적으로는 수차가 물속에 거의 잠긴 것처럼 보이더라도, 수면의 상승과 하강 높이가 커서 부분적으로 수차가 모두 잠기지 못 한 것으로 사료된다. 따라서, 수차가 완전히 물속에 잠길때까지는 일정시간이 요구되고 그 시간만큼 수차의 효율이 작게 나온 것으로 추정된다. 2004년도의 실험은 수차의 위치가 높게 설치되어 있어서 수차가 완전히 물속에 잠기는 시간이 작고 이 때의 유속도 크지 않았다. 따라서, 이 때의 실험에 큰 의미를 부여하기는 어려운 것이 사실이다. 2005년도부터는 수차를 물속으로 더 내려서 일정수준이상의 유속에서 실험이 가능하였다.

Fig. 3 (a)에 의하면 1중 날개인 경우에 유속 1.4에서 2.6 m/s 사이에서 최대수차효율이 30 - 35 % 정도 발생함을 알 수 있다. Fig. 3 (b)를 보면, 2중 날개에 대한 실험에서는 유속 1.4에서 2.6 m/s 사이에서 최대수차효율이 25 - 35 % 사이임을 알 수 있다. 최대수차효율시의 TSR은 1중 날개의 경우는 2.57, 2중 날개의 경우는 2.07 정도가 됨을 알 수 있었다.

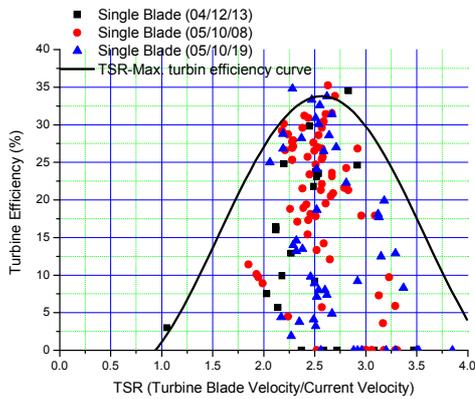


(a) Single blade

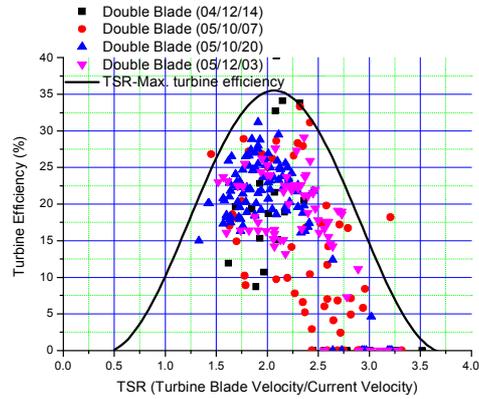


(b) Double blade

Fig. 3 Turbine's efficiency with current velocity



(a) Single blade



(b) Double blade

Fig. 4 Turbine's efficiency with TSR

3. 결과분석

현장실험결과에 의하면 1중 날개가 2중 날개보다 미세하게 효율이 큼을 알 수가 있지만, 그 결과를 확신할만한 뚜렷한 경향을 보인 것은 아니다. 실험기기의 정밀도와 외부환경의 변동요인을 감안할 때, 현재의 실험결과로 수차효율을 확정하는 것은 무리가 있을 것으로 판단된다. 또한, 현재의 현장실험결과는 유속이 3 m/s 이하인 수로의 가장자리에서 측정된 것으로 실제 발전시설물이 들어서는 유속 5 m/s 이상의 고유속 영역에서는 현재의 현장실험결과와 상이한 수차효율이 나올 개연성도 있어, 파이롯트 플랜트에 대한 실험이 필요할 것으로 사료된다.

TSR과 최대수차효율의 상관관계는 실험 case별로 조금씩 다르다. 전체적으로 1중 날개의 경우 최대수차효율에서 2중 날개보다 TSR 값이 조금 큰 경향을 나타냄을 알 수 있다(Fig. 4). 이것은 1중 날개가 2중 날개보다 작은 저항과 가벼운 무게로 좀 더 큰 RPM을 발생시켜서 나타난 현상으로 생각된다. 실험결과들을 종합하여 TSR과 최대수차효율의 상관관계를 나타내는 식을 다음과 같이 도출하였다.

1중 날개

$$T_{eff}(tsr) = 15.2 + 18.6 \cos(1.55tsr - 3.98)$$

최대효율 = 33.8 %, 최대효율시 TSR = 2.57

2중 날개

$$T_{eff}(tsr) = 17.6 + 17.9 \cos(1.87tsr - 3.87)$$

최대효율 = 35.5 %, 최대효율시 TSR = 2.07

그래프를 통한 최대효율은 1중과 2중 날개가 거의 비슷하고 TSR은 1중 날개가 2.57, 2중 날개가 2.07 정도가 됨을 알 수 있다. 이러한 TSR과 최대수차효율의 상관관계는 수차 설계시에 참고자료와 개략적인 발생전력 계산에 사용될 수 있다. 그러나, 이것도 실제 발전시의 유속에서 동일한 특성 발현을 확신하기 어렵기 때문에, 파이롯트 플랜트에 대한 실험을 통해서 검증할 필요가 있다.

현재의 연구는 현장 파이롯트 플랜트에 사용되는 수차의 크기와 형태를 선정하기 위한 기초연구이다. 미국 Northeastern 대학의 실험에서 현재의 실험보다는 작은 크기의 1중 날개로 실험한 날개의 효율이 1.5에서 2.5 m/s의 유속에서 30 - 35 % 정도로 관측되었다. 현재의 1중 날개에 대한 현장실험에서도 유속 1.4에서 2.6 m/s 사이에서 최대수차효율이 30 - 35 % 정도 발생함을 알 수 있었다. 현재의 자료들을 바탕으로 1중 날개 수차효율이 35 %로 추정하는 것은 큰 무리가 없을 것으로 사료된다. 현재 연구되고 있는 발전기는 한 축에서 500 kW의 전력이 생산되는 것으로 가정하여 설계가 되고 있다. 이러한 경우, 수차 축에서는 발전시의 손실율을 감안하여 최소 600 kW의 전력이 생산되어야 한다. 또한, 현재의 울돌목에 대한 환경계측에서 정격유속은 4.8 m/s 정도인 것으로 관측되었다. 이러한 데이터들을 종합해 보면, 최소 600 kW의 전력이 생산되기 위해서는 지름 3 m, 높이 3.6 m 인 수차 3개가 하나의 축에 설치되어야 하는 것으로 계산되었다. 2중 날개도 같은 효율을 가정한다면 같은 사이즈의 수차가 필요함을 추정할 수 있다. 현재의 현장실험결과에서 TSR이 1중 날개는 2.57, 2중 날개는 2.07인데 유속이 4.8 m/s이고 수차의 지름이 3m 라면, 최적 전력발생시의 RPM은 1중 날개의 경우 79이고 2중 날개의 경우는 63정도임을 알 수 있다. 따라서, 파이롯트 플랜트의 한 축에 지름 3 m, 높이 3.6 m인 수차 3개가 사용되면 최적 전력발생시의 RPM은 1중 날개의 경우 79이고 2중 날개의 경우는 63정도이고, 발전기를 통해서 생산되는 전력은 500 kW임을 현재의 현장실험을 통해서 도출할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 울돌목의 조류발전 시스템에 대한 적용을 목적으로 헬리컬 수차에 대한 현장실험을 수행하고 이를 바탕으로 헬리컬 수차의 효율을 평가하고자 하였다. 이러한 결과를 바탕으로 향후 건설될 파이롯트 플랜트에 들어가는 수차의 크기와 생산되는 전력량에 대한 검토를 하였다. 향후 건설될 파이롯트 플랜트에서 실험이 수행되면, 헬리컬 수차에 대한 좀 더 정밀한 효율과 성능결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 해양수산부의 조력·조류에너지 실용화 기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.