

인공수로에서의 수평 배열 헬리컬수차 현장시험 사례와 문제점

강 금석¹⁾, 김 지영²⁾, 이 광수³⁾, 명 철수⁴⁾

Installation of Pilot Plant and Troubleshootings of Horizontally Linked Helical Turbines with Unconfined Free Flow Condition in Artificial Channel

Keum-Seok Kang, Ji-Young Kim, Kwang-Soo Lee, Cheol-Soo Myung

Key words : Hadong thermal power plant(하동화력발전소), Helical turbine(헬리컬 수차), Tidal current power generation(조류력 발전), Discharge channel(방수로), Streamturbine(흐름식 수차)

Abstract : 국내외에 아직 개발 실적이 없는 발전소의 해수방류수를 이용한 조류식발전시스템의 개발을 위하여, 현재 하동화력발전소 해수방수로로 대상으로 헬리컬 수차를 이용한 조류식발전 시험설비를 제작 완료하고, 성능 시험이 진행 중이며, 본 연구에서는 성능 시험 과정에서 나타난 제반 문제점을 제시하고 그에 대한 원인 및 대책을 분석해 보았다. 본 시험설비는 인공수로에서 수평 배열 헬리컬수차로서 기계 장치의 안정성 및 수차의 효율을 평가하고자 하였다. 조류식 시험장치는 배수로의 빠른 유속으로 인하여 시공이 매우 어려웠으며, 인공수로임에도 불구하고 유지관리를 위한 적정 구조 선정이 곤란한 상황이었다. 또한, 헬리컬 수차는 서로 직렬연결되어 운전할 수 있는 장점이 있으나, 본 연구와 같이 다수의 수차가 연결될 경우, 보다 높은 측정률 정확성, 커플링, 베어링 정밀도 등이 요구되어 효율 감소의 원인이 됨을 확인하였다. 본 장치는 시험용으로서 정밀한 베어링 및 수밀구조, 증속장치를 채택하지 않았으나, 상업용에서는 이를 개선할 필요성이 있다고 판단된다. 또한, 수차의 설치와 유지관리 조건 향상, 수차 통과부의 유황 개선, 수차의 효율 향상을 위하여 조류식 수차에도 유도수로와 casing, draft tube와 같은 Confined flow 구조를 일부 채택할 필요성이 있다고 판단된다.

1. 서론

발전소가 냉각수로서 해수를 사용하는 과정에서 대형 취배수 구조물을 이용하는데 냉각수 방류는 Box Culvert 혹은 개수로 형태의 구조물로서, 온배수 방수로에는 유속 2m/s 이상의 빠른 흐름의 수로가 존재하여 수력발전을 꾀할 수 있다. 특히 하동, 보령, 당진 등 국내 대형 화력발전단지에서 냉각수로 사용되고 방류되는 해수는 약 150cms로 (100MWe당 약 5t/s) 약 3,000kW 이상의 수력에너지를 보유하고 있으나, 현재 활용되지 못하고 그대로 해양으로 방류되고 있어 이에 대한 회수를 고려할 필요가 있다. 발전소 온배수의 원활한 배수를 위한 설계 낙차와 함께 남서해안의 조위변화에 따른 낙차로 인하여 온배수 방수로에서 고유량, 고유속의 흐름에너지가 존재하며, 방류량이 일정하여 이를 이용할 경우 연중 일정한 전력을 생산할 수 있고 발전량 또한 매우 크

다. 발전소 방수로는 흐름조건이 비교적 균일하고, 파랑 내습이 없으며, 부유사, 해조류, 부유물 충돌 등의 문제가 발생하지 않아 자연 해양조건보다 조류력 발전에 매우 유리하나, 수심이 낮고, 순환수 계통에의 영향으로 다수의 수차를 설치하기는 어려운 조건을 지니고 있다.

이에 따라 현재 하동화력발전소 해수방수로로 대상으로 헬리컬 수차를 이용한 조류식발전 시험

1) 한국전력공사 전력연구원

E-mail : gldstn@kepri.re.kr

Tel : (042)865-5762 Fax : (042)865-5725

2) 한국전력공사 전력연구원

E-mail : jykim77@kepri.re.kr

Tel : (042)865-5749 Fax : (042)865-5725

3) 한국해양연구원

E-mail : kslee@kordi.re.kr

Tel : (031)400-6300 Fax : (031)408-5823

4) (주)에코션

E-mail : csmyoung@ecocean.co.kr

Tel : (032)467-5750 Fax : (032)469-5753

설비를 제작 완료하고 성능 시험이 진행 중이며, 본 연구에서는 성능 시험 과정에서 나타난 제반 문제점을 제시하고 그에 대한 원인 및 대책을 분석해 보았다.

2. 헬리컬수차 시험설비 제작 및 설치

2.1 현장 조건

하동화력 순환수계통은 해수양수펌프가 없는 1단 취수 방식으로 총 방류량은 최대 156cms에 달하며, 3련의 Box Culvert를 지나서, 개수로 형식 약 250m 길이의 배수로로 통하여 해양으로 방류된다. 방수로 중간부 및 말단부에서 2회에 걸쳐 조위, 유속, 수위를 관측하였다. 수심은 3m ~ 5m 사이로 불규칙하였고, 유속은 최저 약 1.0m/s에서 최대 4.0m/s 이상을 확보하고 있으며, 시험설비는 그림 1과 같이 방수로 중간부에 설치하였다.

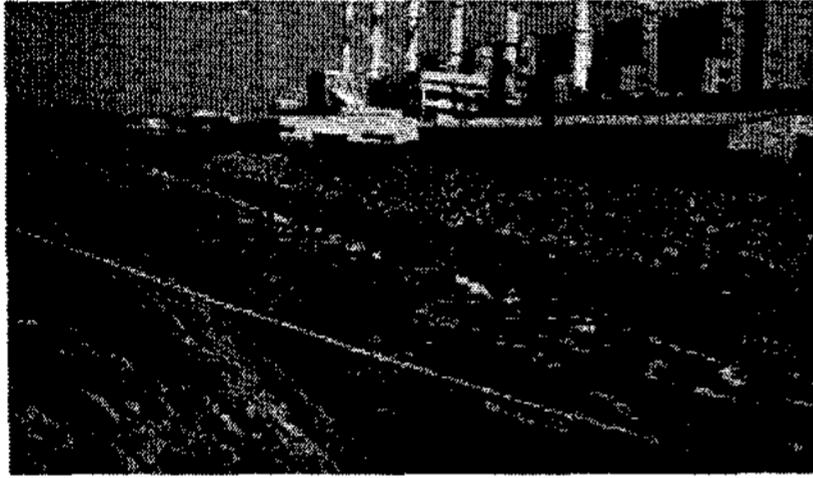


그림 1. 하동화력 해수방수로

2.2 시험설비 구성

현재 시험중인 시험설비는 다음과 같은 제원으로 구성되어 있다.

- 수차의 특성
 - 분류 : 헬리컬, 수평축 연결 구조
 - 크기 : 수차 1기 1.5m X 1.8m
 - 구성 : 6기 1열 직렬연결
- 지지구조물 : 트러스 철골 구조
- 동력전달장치 및 발전기 : 베벨기어, 증속기, 동기발전기 등
- 정격출력 : 약 100kW

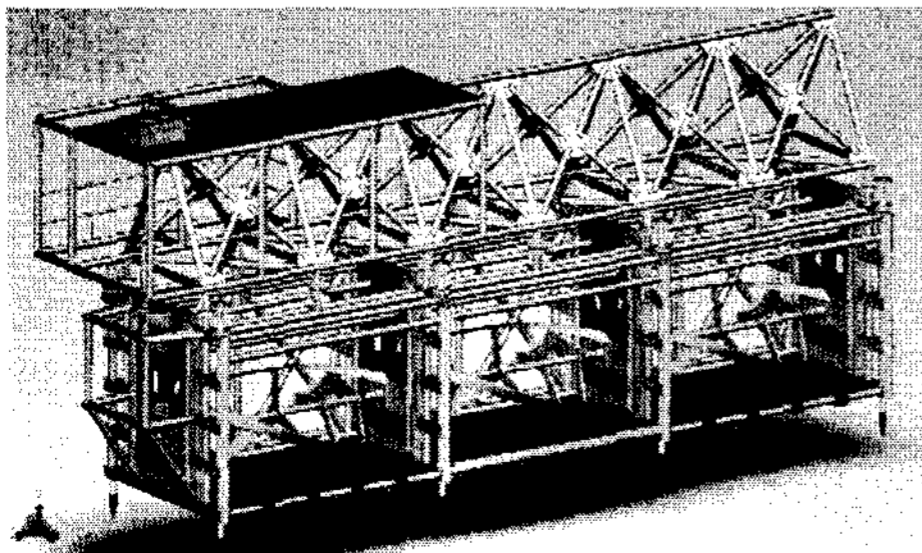


그림 2. 헬리컬수차 발전시스템 1열의 형상

2.3 현장 제작 및 설치

당초 설계시 교량형, 콘크리트 박스 형 등 다양한 지지구조물 형식이 고려되었으나 최종적으로 시공성, 경제성, 유지관리가 가장 유리한 콘크리트 박스 형식을 채택하였다. 그러나 설치지점의 수로 바닥 정밀 측량 결과, 심한 세굴로 바닥면이 매우 불균일하여 콘크리트 박스 형식으로는 안정적인 수평설치가 불가능할 것으로 판단하여 트러스 구조로 변경하였다.

수차 반출입을 용이하게 하기 위하여 지지구조물부와 수차구조물부를 분리 제작하여, 그림 3과 같이 현장에서 하부 지지구조물을 먼저 고정 설치하고 수차구조물부를 거치하는 방식으로 진행하였다. 불균일한 바닥에 안정적인 거치가 되도록 하부 지지구조물의 지지축 8개소에 inner pipe를 삽입하고, 일정 정도 항타 후 각 pipe별 높이를 조절을 통해 수평 보정하였다. 현장 설치 배수로의 빠른 유속으로 난공사가 되었으며, 현장 시험과정에서 설비 개선을 위한 수차의 반출입이 수차례 이루어졌는데 그 결과 본 시험설비의 설치 방식이 유용한 구조임을 확인할 수 있었다.

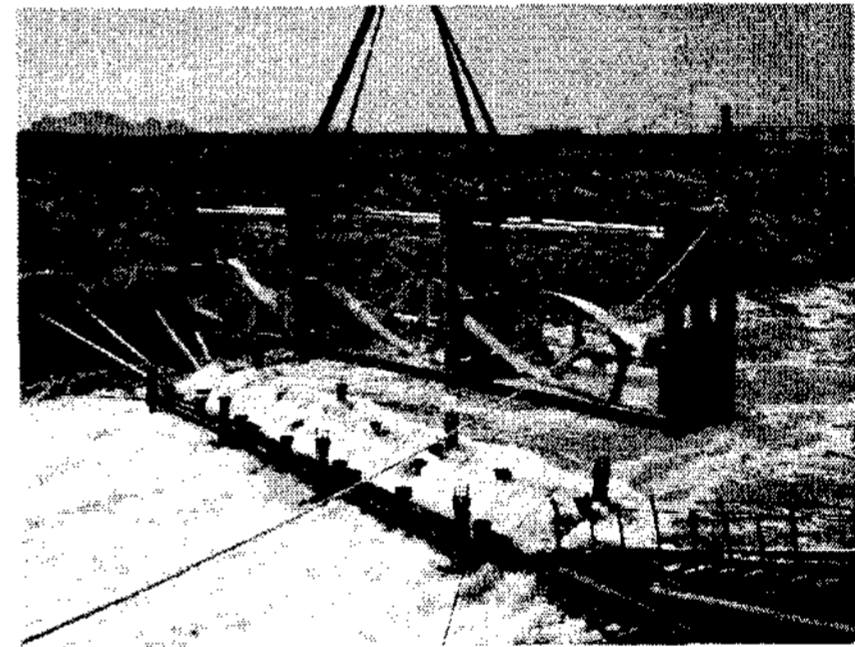


그림 3. 하부 지지구조물과 수차구조물

수차구조물 거치 후 구조물의 변형을 방지하기 위해 그림 4와 같이 상부에 삼각 트러스 구조물을 설치하였으며, 증속기 및 발전기 등을 상부 구조물에 배치하였다. 발전기 분전반은 소내 계통 연결지점 근처의 육상에 설치하고 지중 매설을 통해 발전기 및 계통 연결부와 연결하였다.

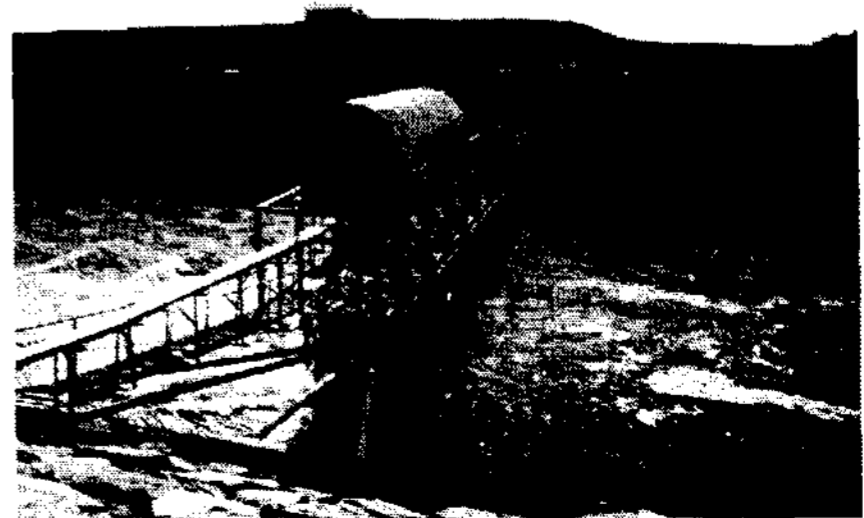


그림 4. 설치 완료된 조류식발전 시험설비

3. 성능시험 및 문제점

3.1 무구속 운전과 회전상태 점검

지지구조물 및 수차를 설치하여 무구속 상태에서 시운전한 결과, 수차의 회전상태가 심각하게 불량하였다. 회전상태 불량 원인을 분석한 결과, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

첫째, 축 정렬이 불량한 것으로 판단되었다. 제작기술의 한계로 인하여 정밀한 축 정렬 기법이 적용되지 않고, 시행착오에 의존한 결과이다. 이에 따라 베어링이 Brake로 작용하고 있는 것으로 판단되었다.

둘째, 베어링 및 커플링 선정이 부적절한 것으로 판단되었다. 수중에 설치되어 윤활유 누출에 의한 환경에의 영향을 고려하여 Oiles Bearing을 선택하였고, 모든 수차가 일체 구조를 유지하도록 Rigid Coupling을 채택하였으나, Oiles Bearing은 접촉식으로 수평축에 적용할 경우, 하중 작용방향으로 편마모 발생이 필연이었으며, Oiles Bearing의 Clearance가 매우 작아 미세한 축 정렬 불량에도 마찰저항이 발생 가능한 구조이었고, Rigid Coupling를 적용함으로써 축 정렬이 불량한 것으로 판단되었다.

실제로 수차 분해 후 Oiles Bearing의 상태를 검사한 결과, 미세한 편마모 현상이 관찰되었다.

셋째, 추력 발생 가능성을 간과하였다. 수평축이 베벨 기어 쪽으로 이동하여 양 끝단에서 마찰저항이 발생함을 확인하였다.

이에 따라 개선 방안을 검토한 결과, 수평축 이동에 지지하기 위하여 Thrust Bearing을 채택할 필요가 있었으며, 정밀한 축 정렬 수행과 최적 상태 유지를 위한 대안 제시가 필요하였다. 미세한 축 정렬 변형에 대응하기 위하여 Flexible(혹은 Gear) Coupling과 마찰저항이 적은 Ball Bearing을 적용하였다. 또한, Coupling과 Bearing에 수밀구조를 적용하고, 구조물 수평 정렬을 위해 스크류 볼트를 사용하였다.

또한, 최상의 Alignment를 확보하기 위하여 육상 무구속 Test를 시행하여, 기준값을 선정하였으며, 구조물에 부착된 장치로 미세 조정을 하였

고, 최상의 Alignment 만족시 구조물에 표식을 부착하였다.

3.2 소내 계통연결 방안

당초 유도발전기 및 전력변환장치를 고려하였으나, 예산상의 이유로 본 연구에서는 시험용 설비로서 출력의 확인에 목적을 두고 동기발전기를 이용하기로 하였다. 그러나, 동기발전기의 경우 수차의 회전수를 주파수에 맞추어야 하기 때문에 특정 시점에서 만이 계통에 투입할 조건이 되는 단점이 있다.

시험설비의 회전불량이 문제가 되어 계통에 투입하기 위한 적정 수차 회전수가 확보되지 않음에 따라 임시로 모터를 이용하여 발전기를 회전시켜 제작된 발전기와 계통 연결 장치의 성능을 확인하였으며, 성공적으로 계통에 연결됨을 확인하였다.

3.3 시운전 및 성능시험

화력발전소가 하계운전 조건으로 6호기 가동상태에서 방류량이 최대규모인 약 156cms일 때, 무구속 회전속도 시험 결과, 증속기 후단에서 약 2800rpm을 기록하였다. 이는 정격속도 1800rpm의 155%로 양호한 결과이다. 이 상태에서 동기발전기로 계통병입을 시도하기 위해서 정격속도 유지 시험을 수행하였다. 회생제동(전기형) 동작시험 결과 1801~1802rpm을 유지하여야 하나 속도조정이 곤란하여 동기발전기로 계통병입이 불가능한 상황이 되었다.

또한, 화력발전소가 동계운전 조건으로 6호기 가동상태에서 방류량이 최소규모인 약 78cms일 때, 토크 및 회전수 측정장치를 부착하여 성능시험을 수행하였다. 유속은 순간 변화폭이 비교적 컸으며, 만조시의 수로 유속은 약 1.5m/s, 간조시는 약 2.0m/s이었다. 수차의 회전수는 30~40rpm으로 Tip Speed Ratio는 약 1.2~1.6 구간에서 분포하였다.

정지상태의 토크는 0.3~0.6kNm이었으며 Starting Torque로 볼 수 있다. 수차의 회전을 브레이크로 순간 정지시켰을 때는 순간적으로 약

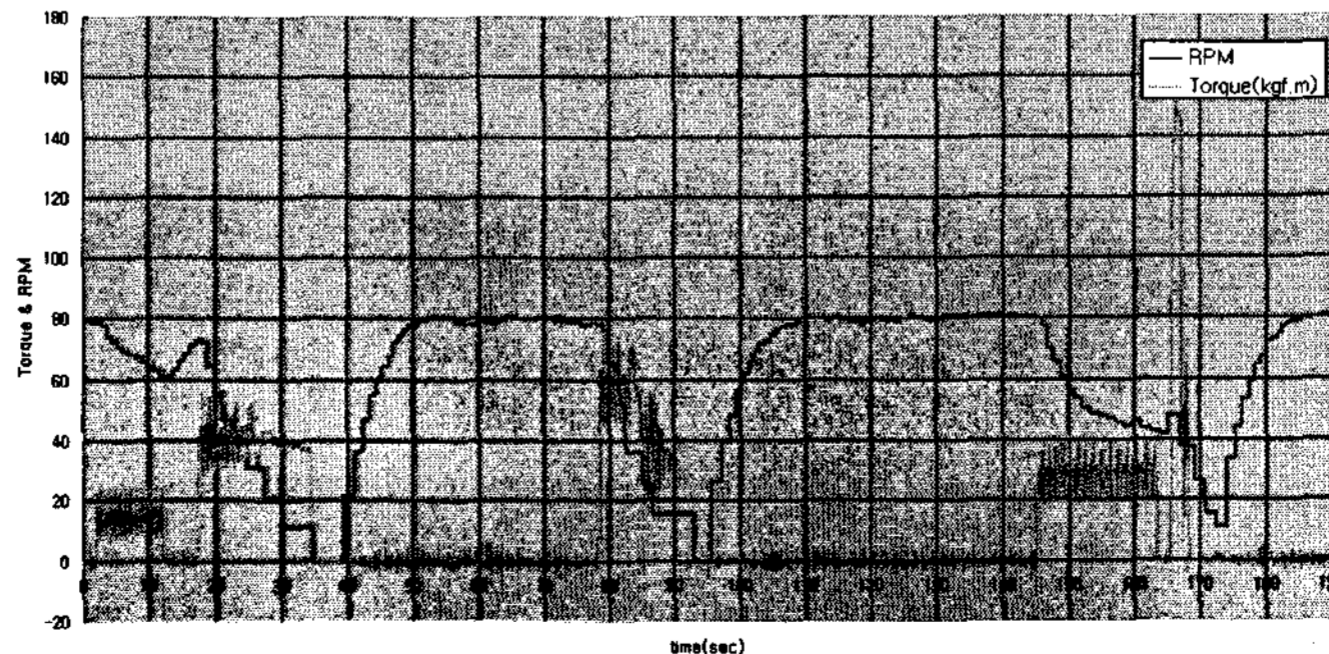


그림 5. 조류식 발전 성능측정 결과 (유속 약 1.8m/s)

2.5kNm의 토크가 걸리나 이는 수차의 회전시 이 수준의 토크가 걸린다고 볼 수는 없다.

회전하는 수차에 브레이크를 부분적으로 잡았을 때, 약 0.5 kNm 이하의 토크가 작용할때에도 수차의 회전이 감소하였다. 즉, 현재 수차는 매우 미약한 회전에너지를 갖고 있다고 판단되었다 (그림 5 참조).

3.4 Tip Speed Ratio(TSR)

Darrius 및 Helical 수차에서 최대 효율을 갖는 TSR은 Solidity Ratio에 따라 결정되게 된다. 즉, Solidity Ratio가 작을수록 최대 효율을 갖는 TSR은 커져 회전수는 증가하고 토크는 작아지게 되며, Solidity Ratio가 클 경우에는 반대로 최대 효율을 갖는 TSR은 작아져 회전수는 감소하고 토크가 커지게 된다. 일반적으로 발전용 수차는 전자의 경우와 같이 고회전수, 저토크로 설계하고, 펌프 등 동력 설비에 이용하는 경우는 후자와 같이 설계하게 된다. 본 시험설비의 Solidity Ratio는 울돌목의 헬리컬 수차에 대한 선행 연구에서 이용된 바 있는 0.14와 동일하여 최적 효율을 보이는 TSR은 약 2.5로 예상된다. 그림 6은 풍력 및 조류력 수차의 시험 설비에서 Solidity Ratio와 TSR과의 관계를 나타내고 있다. 풍력의 경우가 조류식 수차에 비하여 저 Solidity Ratio와 고 TSR 구조임을 알 수 있다.

즉, 본 시험의 헬리컬 수차는 적정 TSR(무구속 일때 약 4.0, 부하 작용시 약 2.5)를 확보하여야만 수로의 유속에너지를 회전에너지로 변환하는 비율이 증가하나, 현재의 수차는 동력전달장치의 저항으로 인하여 무구속 상태에서도 충분한 회전수 확보가 되지 않아(최대 약 1.6) 매우 미약한 힘을 갖는 저 TSR 영역에 머무르고 있는 것으로 판단되었다. 따라서, 충분한 회전수를 확보할 수 있도록 동력전달장치의 각 부분에 대한 점검을 수행중에 있다.

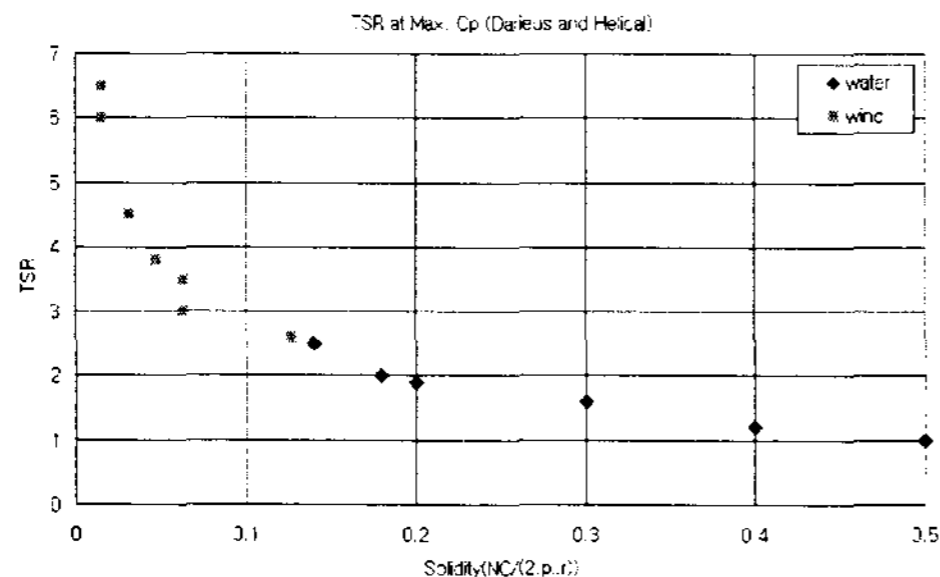


그림 6. Solidity Ratio와 TSR

4. 결론 및 향후 연구방향

국내외에 아직 개발 실적이 없는 발전소의 해수방류수를 이용한 조류식발전시스템의 개발을 위하여 하동화력발전소 방수로에 시험설비를 설치하여 현장시험을 수행하고 있다. 본 시험설비는 인공수로에서 수평 배열 헬리컬수차로서 기계 장치의 안정성 및 수차의 효율을 평가하고자 하였다. 조류식 시험장치는 배수로의 빠른 유속으로 인하여 시공이 매우 어려웠으며, 인공수로임에도 불구하고 유지관리를 위한 적정 구조 선정이 곤란한 상황이었다. 또한, 헬리컬 수차는 서로 직렬연결되어 운전할 수 있는 장점이 있으나, 본 연구와 같이 다수의 수차가 연결될 경우, 보다 높은 측정 정확성, 커플링, 베어링 정밀도 등이 요구되어 효율 감소의 원인이 됨을 확인하였다. 본 장치는 시험용으로서 정밀한 베어링 및 수밀구조, 증속장치를 채택하지 않았으나, 상업용에서는 이를 개선할 필요성이 있다고 판단된다. 또한, 수차의 설치와 유지관리 조건 향상, 수차 통과부의 유황 개선, 수차의 효율 향상을 위하여 조류식 수차에도 유도수로와 casing, draft tube와 같은 Confined flow 구조를 일부 채택할 필요성이 있다고 판단된다.

References

- [1] 산업자원부(2007). 발전소 해수방수로 조류식발전시스템 개발(2차년도 중간보고서).
- [2] 해양수산부(2002). 해양에너지 실용화 기술 개발(II): 조력·조류에너지
- [3] Dalhousie University(2004). Self-starting Darrius Wind Turbine. Design Project-MECH 4020.
- [4] Shiro, M. et al. Comparison of Water Turbine Characteristics using Different Blades in Darrius Water Turbines used for Tidal Current Generations. Nihon University.
- [5] Strickland, J.H.(1975). The Darrius Turbine: A Performance Prediction Model using Multiple Streamtubes. Sandia National Labs report, SAND75-0431.