

하동화력 방수로 조류식발전 개발규모 산정 및 수리특성 분석

김 지영¹⁾, 강 금석²⁾, 이 대수³⁾

Estimation of Development Capacity Applicable to Current Power Generation System at the Discharge Channel of Hadong Thermal Power Plant

Ji-Young Kim, Keum-Seok Kang, Dae-Soo Lee

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

Abstract : 국내외에 아직 적용 실적이 없는 발전소의 해수방류수를 이용한 조류식발전시스템의 개발을 위하여 하동화력발전소 방수로에 시험용 조류식 발전시스템을 설계 및 제작하여 현장시험이 진행 중이며, 이를 확장하여 상업용 발전을 위한 총 개발 규모를 산정하고 경제성을 분석하였다.

조류식발전구조물의 형상 설계, 가이드 베인을 이용한 출력 조절을 통하여 방수로의 수류상태를 적절히 조절하여 설계하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 조류식발전구조물 설치시 방수로의 수리특성 수치 계산 결과로 판단할 때 발전출력에 의한 에너지 회수 뿐만 아니라 조류식발전구조물의 단면축소 효과 및 수두손실이 방수로의 수위 변화에 상당한 규모로 영향을 주고 있음을 확인하였다. 조류식발전구조물 설치 이전의 유속 관측 결과를 이용하여 발전량을 산정한 경우 소수력발전 단가 적용시 경제성이 떨어지지만, 조류식발전시스템의 설치시 유속 증가 효과가 나타날 뿐만 아니라 가이드 베인 등을 이용하여 발전량 증대를 꾀하면 충분한 경제성을 확보할 수 있는 조류식발전시스템의 설치가 가능할 것으로 판단된다.

Nomenclature

- A : front area of turbine, m²
- η : efficiency
- P : output, kW
- ρ : seawater density, 1.025 t/m³
- V : velocity, m/s

1. 서 론

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 크다. 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 대하여 본 연구에서는 현재 개발 중인 발전소 온배수를 이용한 조류식발전 시스템의 상

-
- 1) 한국전력공사 전력연구원
E-mail : jykim77@kepri.re.kr
Tel : (02)865-5772 Fax : (02)865-5725
 - 2) 한국전력공사 전력연구원
E-mail : gidstn@kepri.re.kr
Tel : (02)865-5762 Fax : (02)865-5725
 - 3) 한국전력공사 전력연구원
E-mail : dslee@kepri.re.kr
Tel : (02)865-5760 Fax : (02)865-5725

업용 발전을 위한 총 개발 가능 규모를 산정하기 위해 수리특성 분석 및 발전원가 계산 및 경제성 분석을 실시하였다.

2. 조류식발전 시스템 개요

2.1 현장 조건

하동화력 순환수계통은 해수양수펌프가 없는 1단 취수 방식으로 총 방류량은 최대 156cms에 달하며, 3련의 Box Culvert를 지나서, 그림 1과 같이 개수로 형식, 약 250m 길이의 배수로를 통하여 해양으로 방류된다. 방수로 중간부 및 말단부에서 2회에 걸쳐 조위, 유속, 수위를 관측하였으며, 발전시스템 설치 지점인 중간부에서의 유속 관측결과를 그림 2와 같다. 수심은 3m ~ 5m 사이로 매우 불규칙한 양상을 보이고 있다.

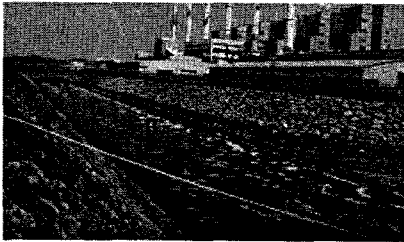


그림 1 하동화력 해수방수로

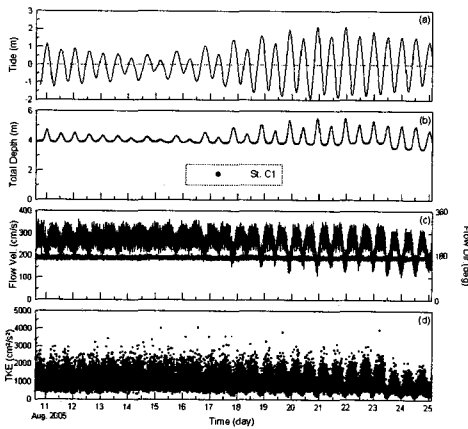


그림 2 수리특성 관측 결과

2.2 시스템 구성

현재 제작 시험중인 시험설비는 방수로 중간부(B지점)에 설치되었으며, 다음과 같은 제원으로 구성되어 있다.

- 수차의 특성
 - 분류 : 헬리컬, 수평축
 - 크기 : 1.5m X 1.8m
 - 구성 : 6기 1열 직렬연결

- 동력전달장치 및 발전기 : 베벨기어, 증속기, 동기발전기 등

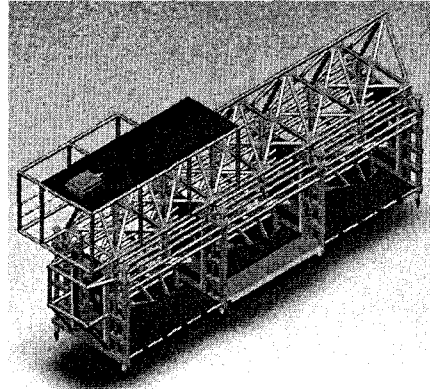


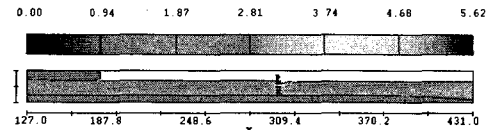
그림 3 조류식발전 시스템 1열의 형상

3. 총개발 규모 산정

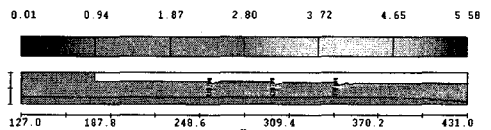
이미 설치된 1열의 시험설비는 기본으로 배치하고 추가설치하는 것으로 고려할 때, 상업용 발전을 위한 총 개발 규모는 수로내 설치 가능한 최대 열인 5열로 하였다. 열간의 간섭을 피하기 위하여 40m의 이격거리를 두었다.

3.1 수리특성 분석

자유수면 해석에 탁월한 Flow-3D를 이용하여 발전시스템 설치시의 수위변화 및 유속분포를 살펴해보았다. 실제 시스템 형상을 그대로 반영하기에는 해석시간이 과다하게 소요되는 등 무리가 있어, 구조물을 개략적으로 표현하였고 수차 회전에 의한 영향을 수두손실로 가정하여 평가하는 등 개략 추정치임을 밝히며, 정성적인 경향을 살펴보는 데 주력하였다.

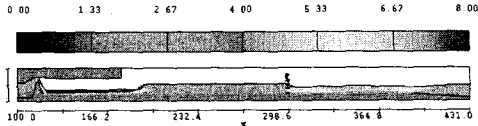


(a) 1열 설치시

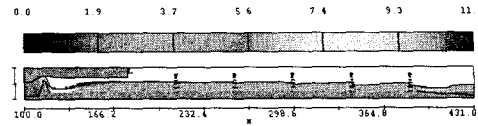


(b) 3열 설치시

그림 4 발전시스템 설치시 유속 및 수위분포도 (만조 및 최대방류량(156cms)시)



(a) 1년 설치시



(a) 5년 설치시

그림 5 발전시스템 설치시 유속 및 수위분포도
(평균해수면 및 방류량 130cms)

방수로의 유속이 작을 경우(고조일때, 저조시에도 유량이 적을때)에는 조류식발전구조물의 설치시 수두손실이 작아 상하류의 급격한 수위 변화가 적었다. 그리고 조위 및 방류량의 변화에 따른 모든 경우에 대하여 조류식발전소에서 단면 축소에 의한 유속 증가 효과가 기대되었다. 조류식발전구조물의 설치에 따라 상류의 수위가 증가하는데 특히, 저조일때 수위 증가 효과가 크게 나타나고, 만조일때는 흐름단면적이 커서 상대적으로 수위 증가가 적다.

조류식발전구조물의 형상에 따라 흐름단면적 축소 효과 및 수두 손실량이 결정되며, 발전출력과 함께 중요한 설계조건임을 확인하였다. 즉, 조류식발전구조물의 설치에 따른 에너지 감쇄량(수위증가, 유속저감)은 설계결과에 따라 조절될 수 있다. 예로, 조류식발전수차에서의 속도 증가 및 수위조절을 위해서 가이드 베인의 설치를 고려해 볼 필요가 있다.

3.2 발전량 계산

발전량(kW) 산정식은 다음과 같다.

$$P = 0.5 \times \eta \times \rho \times A \times V^3 \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

여기서, P 는 출력, η 는 효율, ρ 는 해수의 밀도, A 는 수차의 전면 면적, V 는 유속이다.

출력계산시 터빈 크기는 1.5m x 1.8m 이며, 터빈효율 35%, 발전설비효율 85%를 적용하였다(전체 효율 29.75%).

관측결과를 출력 계산에 직접 이용하였다. 다양한 조석조건 및 방류량 조건을 직접 반영하기는 어렵지만 수로의 유속변화특성을 직접 계산에 이용할 수 있는 장점이 있다. 조석의 조화분석 결과와 수위변화에 따른 배수로의 유속 관계식을 발전량 산정에 이용할 수도 있지만, 수위-유속 관계식이 부족한 관측량으로 정확하다고 보기 힘들었고, 발전량이 유속의 세제곱에 비례하여 유속의 작은 변화에도 매우 급격한 변화를 보이기 때문이다. 보다 정확한 발전량 산정은 시험설비의 가동시 유속특성을 분석하여 가능하다.

표 1 발전량 산정결과

	배수로 중간부, 방류량 104cms	배수로 하류부, 방류량 130cms	배수로 하류부, 방류량 78cms
1기당 평균 출력(kW)	7.77	15.27	4.43
1기당 월간(31일) 발전량(kWh)	5,779.40	11,359.45	3,299.23
1월 월간(31일) 발전량(MWh)	34.68	68.16	19.80
5월 월간(31일) 발전량(MWh)	173.38	340.78	98.98

연간 발전량은 발전소의 가동조건을 고려하여 계절별로 연간 방류량 분포를 가정하여 계산하였다. 방수로에 조류식발전구조물을 설치할 경우 단면 축소 효과를 인하여 관측시보다 유속이 증가하게 되어 발전량 또한 증가할 가능성이 크지만 보수적인 관점에서 관측값을 이용한다. 연간 발전량(MWh)은 1월당 6기(3 set)가 5월이 배치되어 총 30기 가동시 2,793 MWh로 예상되었다. 참고로, 조위의 조화분석 결과와 수위-유속 관계식을 이용할 경우, 월별 발전량은 3,000 ~ 4,000 MWh로 산정되며, 발전유속을 3m/s로 고정할 경우는 3,223 MWh로 산정된다.

3.3 발전원가 계산 및 경제성 분석

발전원가 계산은 연간등가비용을 연간발전량으로 나누어 산출하는 방식을 채택하였으며 이와 아울러 경제성분석을 실시하였다.

3.3.1 연간등가비용

연간등가비용 산출에 필요한 사업비는 시험설비 제작비를 단순히 산출합하여 총 5년의 조류식발전 시설 사업비를 산출하였다. 여기에서, 시험설비에 비해 상용발전소의 경우는 내구연한 및 구조물 안정성을 고려하여 제작비용의 증가가 발생할 수 있는 반면, 다수 호기 제작으로 인한 부품 제작 비용 및 부대비용의 감소 효과를 기대할 수 있지만, 본 검토에서는 고려하지 않았다.

표 2 연간등가비용 산정결과

할인율(%)	내구연한(년)	자본회원계수	연간등가비용
6.0	30	0.072649	153

유지관리비용(%)				유지관리비 연간등가비용
법인세 및 제세	보험료	유지 및 수선비	계	
0.42	0.22	2.90	3.54	75

3.3.2 발전원가 계산

발전원가는 표 3과 같이 연간등가비용을 연간 발전량으로 나누어 계산하였으며 본 사업의 연간 발전량은 2,793 MWh이다.

표 3 발전원가 계산결과(소수력 단기적용)

연간등가 비용 (백만원)	연간 발전량 (MWh)	발전원가 (원/kWh)	판매단가 (원/kWh)	B/C
228	2,793	81.5	72.8	0.89

- * 판매단가는 소수력 단기 적용. 조류식 단가는 미확정(풍력 수준 예상)
- * 2006년 조정가 기준 : 1MW미만 고정가격 72.8 원, 변동가격 SMP+10

3.3.3 경제성 평가

표 4와 같이, 발전량 산정시 관측값을 이용할 경우 B/C ratio는 0.89로서 경제성이 불리한 것으로 나타났다. 그러나, 조위의 조화분석 결과와 수위-유속 관계식을 적용할 경우와 3.0m/s의 발전유속을 적용할 경우는 B/C ratio가 1.0 이상으로 경제성을 확보하는 것으로 계산되었다. 또한, 풍력발전 단가를 적용하는 경우에는 B/C ratio가 1.32로 매우 경제성이 있는 것으로 나타났다.

표 4 산정방식별 경제성 평가

산정방식	관측값 이용	수위-유속관계식 적용	3.0 m/s 발전 유속 적용	관측값 이용(풍력단가 적용)
연간발전량(MWh)	2,793	3,473	3,223	2,793
발전원가(원/kWh)	81.50	65.55	70.64	81.50
판매단가(원/kWh)	72.8	72.8	72.8	107.66
B/C	0.89	1.11	1.03	1.32

전술한 바와 같이 조류식발전구조물을 설치할 경우 단면 축소 효과로 인하여 배수로의 유속은 증가하게 된다. 또한 유속을 증가시키기 위하여 가이드 베인을 설치하는 방안을 적용할 수도 있다. 조류식 발전의 경우, 출력이 유속의 세제곱에 비례하게 되어 약간의 유속 증가로도 발전량은 매우 크게 증가한다. 따라서, 시험설비의 운전을 통하여 적절한 발전량 산정 및 발전량 증대를 도모할 수 있을 것이다. 결론적으로 충분한 경제성을 확보할 수 있는 조류식발전시스템의 설치 가능성이 있다고 판단된다. 다만, 상용발전소의 건설시 고려사항으로는 다음과 같은 것이 있다.

적절한 발전기 선정이 필요하다. 시험설비 제작시 유도발전기를 적용하려고 하였으나 높은 제작 단가로 인하여 브레이크시스템을 갖는 동기발전기를 채택하였다. 그러나, 상용발전소의 경우

다수의 발전기를 제작하므로 유도발전기를 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 계통 연결 방식을 결정해야 한다. 한전의 배전선로에 연결할 경우 추가적인 선로 비용이 발생하므로 발전소 소내 전원에 연결하고 차액보전을 받는 방식을 추진해야 한다. 설치 구조물의 단순화가 필요하다. 5열의 발전시스템을 설치할 경우 기존의 1열 독립지지 방식의 단순화가 가능한가에 대한 검토가 필요하다.

4. 결론 및 향후 연구방향

국내외에 아직 적용 실적이 없는 발전소의 해수방류수를 이용한 수력발전시스템의 개발을 위하여 하동화력발전소 방수로에 설치하는 조류식발전시스템을 설계 및 제작하여 현장시험이 진행 중이며, 이를 확장하여 상업용 발전을 위한 총 개발 규모를 산정하고 경제성을 분석하였다.

조류식발전구조물의 형상 설계, 가이드 베인을 이용한 출력 조절을 통하여 방수로의 수류상태를 적절히 조절하여 설계하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 개략적인 수치 계산 결과로 판단할 때 발전출력에 의한 에너지 회수 뿐만 아니라 조류식발전구조물의 단면축소 효과 및 수두손실이 방수로의 수위 변화에 상당한 규모로 영향을 주고 있음을 확인하였다. 조류식발전구조물의 형상 및 발전출력량(설치 열수 결정)에 따라서 방수로의 수위 및 유속의 변화량이 결정되고 조절이 가능함(방류량 및 조위에 따른 수위 변화에 따라 방수로의 수위 변화는 2m 이상도 가능함)을 알 수 있었다. 유속 관측 결과를 이용하여 발전량을 산정한 경우는 B/C ratio가 1이하로 경제성이 떨어지지만, 조류식발전시스템의 설치시 유속 증가 효과가 나타날 뿐만 아니라 가이드 베인 등을 이용하여 발전량 증대를 피하면 충분한 경제성을 확보할 수 있는 조류식발전시스템의 설치가 가능할 것으로 판단된다. 향후 시험설비를 통한 실제 발전량 측정이 완료되면 보다 구체적인 개발규모 및 경제성을 평가할 수 있을 것이다.

References

- [1] A.M. Gorlov(2004). Tidal Energy Project for the Uldolmok Strait, using Gorlov Helical Turbines (GHTs) Technical Report No. 3
- [2] 산업자원부(2006). 발전소 해수방수로 조류식발전시스템 개발(1차년도 중간보고서).
- [3] 한국전력공사 전력연구원(2006). 하동화력 조류식발전 시험설비 설계보고서.
- [4] 해양수산부(2006). 조력·조류에너지 실용화 기술개발 1단계 보고서