

방류수의 수위 및 유량 분석을 통한 해양 소수력 성능평가

강금석*, 김지영, 유무성**

Performance Evaluation of Ocean Small Hydropower Plant by Analyzing Water Level and Flow Rate of Circulating Water

Keum-Seok Kang*, Ji-Young Kim and Moo-Sung Ryu**

Abstract

The Samcheonpo ocean small hydropower plant (SHP) has a special feature of using marginal hydraulic head of circulating water system of fossil fuel power plant as a power source and having the characteristics of general hydropower generation and tidal power generation as well. Also, it contributes to reducing green house gases and developing clean energy source by recycling circulating water energy otherwise dissipated into the ocean. The efficiency of small hydropower plant is directly affected by effective head and flow rate of discharged water. Therefore, the efficiency characteristics of ocean hydropower plant are analyzed with the variation of water level and flow rate of discharged water, which is based on the accumulated operation data of the Samcheonpo hydropower plant. After the start of small hydropower plant operation, definite rise of water level was observed. As a result of flow pattern change from free flow to submerged flow, the instability of water surface in overall open channel is increased but it doesn't reach the extent of overflowing channel or having an effect on circulation system. Performance evaluation result shows that the generating power and efficiency of small hydropower exceeds design requirements in all conditions. Analysis results of CWP's water flow rate verify that the amount of flowing water is measured less and the highest efficiency of small hydropower plant is achieved when the effective head has its maximum value. In conclusion, efficiency curve derived from water flow rate considering tidal level shows the best fitting result with design criteria curve and it is verified that overall efficiency of hydropower system is satisfactory.

Key words

Ocean Small Hydropower Plant(해양 소수력 발전소), Performance Evaluation(성능평가), Circulating Water Pump(순환수 펌프), Efficiency(효율)

(접수일 2009. 8. 31, 수정일 2009. 9. 28, 게재확정일 2009. 9. 28)

* 한국전력공사 전력연구원

■ E-mail : gldstn@kepri.re.kr ■ Tel : (042)865-5228 ■ Fax : (042)865-5202

** 한국전력공사 전력연구원

■ E-mail : faust001@kepri.re.kr ■ Tel : (042)865-5233 ■ Fax : (042)865-5202

Nomenclature

E : effective hydraulic head, m
 P : electric power, kW
 Q : flow rate, cms
 η : efficiency
 ρ : density, kg/m³

Subscrip

CWP : circulating water pump
 SHP : small hydropower plant
 E, M : estimated, measured
 T, G : turbine, generator

1. 서론

국내 대형 화력발전소에서 냉각수로 사용되고 방류되는 해수는 6개 호기를 기준으로 약 150cms이며 개발 가능한 수력 에너지는 약 3,000kW 이상이 된다. 그러나, 방류수가 보유한 수력에너지는 그 동안 자원으로 활용되지 못한 채 그대로 해양으로 방류되어 왔다. 이에 전력연구원과 한국 남동발전⁽⁶⁾은 순환수 계통의 여유 설계낙차와 남서해안의 조위변화에 의한 해수의 낙차를 이용한 발전의 가능성을 인지하고 삼천포 화력발전소 배수로에 세계 최초로 해양소수력 발전시스템 설치를 완료하였다. 해양 소수력은 소수력 발전방식과 조력 발전방식을 동시에 활용하는 특성을 갖고 있으며 미활용되는 온배수의 수력 에너지를 활용하기 때문에 청정 재생에너지 개발 및 CO₂ 저감효과 창출에 기여하고 있다.

본 연구에서는 수위, 유량, 조위 관측 자료를 이용하여 예상출력을 구하고 이를 실제 출력과 비교하여 성능평가를 시행하였으며, 발전소의 최적 운영방안을 도출하였다. 세계 최초로 상용화된 삼천포 해양소수력 발전소의 5개월간 운전실적 자료와 약 3년간의 수위, 조위 및 방류량의 관측자료를 이용하였다.

2. 운전 실적자료를 이용한 성능평가

2.1 성능평가 절차

해양 소수력 발전소가 가동하는 단계에서 필요한 성능평가 절차는 Fig. 1과 같다. 먼저 수차 및 발전기의 효율은 수위, 조위, 유량 등 흐름특성의 영향을 받기 때문에 이에 대한 정확한 분석을 위해서 발전소 운영과정에서 충분한 관측이 수행되어야 하며, 이러한 관측 자료의 신뢰성 확보를 위한 비정기적인 보완관측 또한 필요하다.^(1,4) 이와 함께 소수력발전 시의 수위변화에 의한 기존 순환수계통에의 영향을 평가하기 위하여 CWP(Circulating Water Pump)의 동력소모량을 측정하여야 한다. 다음으로 흐름특성 관측자료를 이용하여 예상 발전출력을 산정하고 이를 실제 측정된 발전량과 비교한다. 발전시스템 인수조건(10%로 가정) 이내의 차이를 보일 경우에는 합격으로 판정하나, 결과 값에 큰 차이가 발생할 경

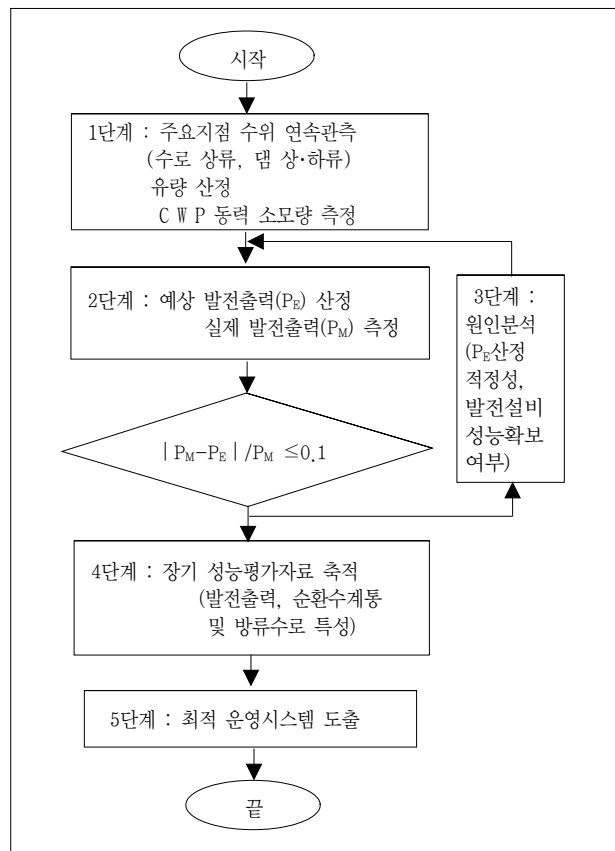


Fig. 1 Flowchart of performance evaluation

우에는 예상출력 산정방식의 적정성, 발전시스템의 성능확보 여부 등 원인분석을 실시한다. 이후 발전소 운영과정에서 1~3단계의 과정을 반복 수행하여 장기간의 성능평가 자료를 축적한다. 최종적으로는 축적된 자료를 분석하여 최적의 발전소 운영방안을 도출한다. 본 연구에서는 3년여 간의 관측자료를 바탕으로 도출된 최적 운전조건을 Table 3에 제시하였다. 해양소수력 발전시스템의 성능평가를 위해서 가장 중요한 항목은 정확한 유량측정이다. 일반 수력발전시스템의 경우에는 수차유입부에서 다수 지점의 유속을 측정하여 유량을 계산하지만, 본 연구와 같은 해양 소수력의 경우는 CWP의 설계 특성을 알고 있기 때문에 조위변화와 펌프 운전실적을 이용하면 비교적 정확하게 유량을 측정할 수 있는 특성이 있다.

2.2 소수력 건설 전·후 수위변화 분석

소수력 건설 전·후의 배수로 수위 상승량을 분석한 결과^(2,3), 정격냉각수량이 130cms일 때 소수력 건설 후의 배수로 수위는 평균 E.L. 4.825m, 최대값 E.L. 5.975m, 최소값 E.L. 4.181m로서 소수력 건설 전 실측치 E.L. 4.61m와 비교시 평균수위가 0.215m 상승하여 예측치 E.L. 4.7~E.L. 5.17m⁽⁶⁾와 비슷한 결과를 보였다. 그러나, Fig. 2와 같이 배수로 수위의 변화율은 소수력 건설 이후에 매우 크게 나타남을 확인 하였다. 표준편차 값이 27.8cm로서 소수력 건설 전 편차가 2~3cm 내외인 점을 감안하면, 배수로 수위의 변화폭이 크고 매우 불안정한 구조임을 알 수 있다.

유량 117cms일 때와 103.9cms일 때 평균수위는 소수력 건설 전 실측치 대비 각각 0.349m, 0.432m 상승하였다. 유량

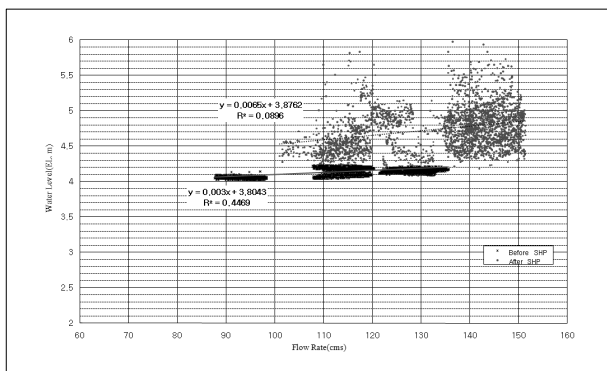


Fig. 2 Variation of water level in discharge channel before and after installation of SHP

이 적을수록 수위 상승량이 크게 나타나는데, 소수력 설계 시 모든 CWP가 가동하는 조건인 최대 정격유량에서의 통수능을 기준으로 운전수위를 결정했기 때문이다. 이 때에도 표준편차는 각각 0.211m, 0.184m로 소수력 건설 전과 비교하여 큰 값을 나타내었다. 다만, 유량이 97.4cms인 경우는 수위의 표준편차가 0.088m로서 냉각수량이 감소함에 따라 수위의 변화폭은 감소하였다.

소수력 건설 후 수위의 변화율이 크게 나타나는 것은 수위 관측 시점이 소수력발전소 건설 끝 단계와 시운전 중으로 안정적인 방류수 배출이 어려워 냉각수가 부분적으로 월류되는 경우였기 때문이기도 하지만, 근본적으로 소수력 설치에 따라 배수로 수위 불안정성이 증가할 것으로 예상된다. 즉, 기존 위어부와 배수로 말단 낙차부에서 발생한 수면파와 소수력 수차의 급정지, 수문의 개폐에 의한 압력파의 일부가 배수로 상류까지 전파되어 영향을 주기 때문이다. 본 소수력발전소가 위어부에서 불완전 월류구조를 채택함에 따른 당연한 결과이며, 위어부에서 완전월류 구조를 형성하도록 운전수위를 낮게 운전하여 위어부에서 사류(supercritical flow) 흐름을 만든다면 이러한 단파가 상류로 전파되는 것을 막을 수 있을 것이다.

2.3 수위상승에 의한 순환수계통에의 영향 평가

현재 삼천포 화력발전소 모든 호기의 폐정(Seal well)은 잠김위어(Submerged Weir) 구조이므로 배수로 위어부의 수위 상승은 순환수관 말단부 Seal well의 수위 상승으로 직결된다. 표준 위어공식에 의해 검토한 바에 의하면⁽⁶⁾ 50cm의 하류 수위 상승에 대하여 48cm정도의 Seal well 수위 상승이 이루어지고 있다. 현장의 배수로 수면 경사는 4호기 Seal well 부분까지는 경사가 완만하고 5,6호기 부분은 큰 유량으로 인하여 상대적으로 수면경사가 급하다. 배수로의 위어 인접부는 배수로 위어의 수위와 직접 연동되어 변화하기 때문에 배수(Backwater)에 대한 검토가 필요 없으나, 3호기의 경우에는 배수로의 폭이 급격히 줄어들기 때문에 수위변화의 가능성이 커지므로, Seal well 상류부에 대한 배수의 영향을 상세하게 고려해야만 정밀한 수위변화 값을 얻을 수 있다. 그러나, 모든 경우의 수에 대하여 배수의 영향을 매번 고려하기는 곤란하므로, 기존 배수로의 수위 해석 결과를 활용하여 배수로 위어의 수위 상승이 Seal well부 수위상승과 직접 연동

되는 것으로 보고 해석을 수행해도 문제가 없을 것으로 판단된다. 즉, 이 방안이 배수로의 안전이나 소수력 성능평가에 있어서도 좀 더 보수적인 방안이라고 할 수 있다. 펌프 특성 곡선을 이용하면 CWP의 경우 전체 양정고가 10cm 증가할 경우 BHP(Brake Horse Power)가 대당 약 5kW 증가하며 그에 따른 유량은 약 0.3% 감소한다. 따라서, 배수로의 수위가 약 30cm 상승하고 모든 CWP가 가동된다면 약 180kW의 BHP가 증가하게 되며 유량은 약 1% 감소된다고 볼 수 있다.

배수로의 수위 상승에 의한 순환수 계통에의 영향을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 배수로의 수위 상승은 순환수계통의 운전 정지 등 중대한 사고를 초래하지는 않을 것으로 판단된다. 그 이유는 CWP 작동시의 양정고 범위가 약 7m~15m 정도임에 비하여 배수로의 수위상승 폭은 상대적으로 작아 이것이 계통의 안전문제와는 직결되지 않기 때문이다.

둘째, 배수로의 수위 상승은 배수로 상류에서의 범람을 초래할 수 있으나 삼천포 화력의 경우에는 배수로 상류부의 범람을 방지하기 위해 5,6호기 설계 시 순환수량의 증가를 고려하여 배수로 벽면을 충분히 높였기 때문에 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

셋째, 위에서 살펴본 바와 같이 현재 모든 호기의 Seal well 위어는 일반적인 가동조건에서(4개호기 이상 가동상태) 잠김위어 상태이므로, 소수력 발전소 건설에 따라 배수로 위어 상류부의 수위 상승이 조금이라도 이루어진다면, 이론적으로는 냉각수량의 감소와 CWP의 BHP가 증가함으로 추가 동력이 소모된다고 볼 수 있다. 그러나, 소수력 건설 이전에도 CWP의 가동대수의 변동 및 조위의 변화에 따라 냉각수량과 수위가 항상 변화하고 있는 상태였으므로, 소수력 건설에 따른 수위 변화가 큰 규모가 아니라면 순환수 계통의 안전에 큰 지장이 없을 뿐만 아니라 추가동력 소모량이나 냉각수 감소량 또한 전체 순환수 계통의 용량에 비해 매우 작은 양이기 때문에 시스템 내에서 용인될 수 있을 것으로 판단된다.

2.4 시스템 효율평가

발전소 완공 후 2007년 1월 22일부터 23일까지 성능시험을 수행하였다. 설계유량, 130cms에 근접하도록 CWP를 추가 가동하여 유량을 확보하였으며, 측정 시에는 대조평균간 조위(E.L. -1.339m), 평균해수면(E.L. -0.03m), 대조평균

만조위(E.L. +1.279m) 등 3개의 설계조위 부근에서 6개호기 수차를 동시에 가동하였다.

성능시험 결과를 살펴보면 Table 1과 같이 낙차와 유량보정을 실시할 경우, 최대출력, 평균출력, 최소출력 모든 부분에서 보증치를 상회하는 값을 보였으며, 효율 또한 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그런데, 이 값은 제작사의 최대효율 보증치 84%를 상회하며 최고 효율의 경우 97%의 값을 보이는 등 설계 원리에 배반하는 현상이다. 성능시험 기간뿐만 아니라 5개월 간의 운전자료 분석시에도 동일하게 효율이 100%를 초과하는 구간이 빈번하게 나타나고 있었다.

Fig. 3은 실측유량과 정격유량의 차이를 보여주고 있다. 실측유량이란 수차 입구부에서 측정한 유량을 말하고, 정격유량이란 CWP의 설계유량을 의미한다. 그런데, 실측유량이 정격유량보다 항상 약 10% 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러나, CWP의 정격유량이란 최저조위일 때의 최소유량으로서 조위가 증가함에 따라 연동하여 증가되기 때문에 실제 측정된 유량은 항상 이 값보다 커야 한다. 결국, 이는 유량측정이 잘못되었음을 보여준다. 그 결과, 설계효율 보다 과다하게 상회하는 효율을 보이는 경우가 발생하게 된 것이다. 실측유량이 아니라 CWP 정격설계유량 130cms를 효율 계산에 적용하면, 설계사 보증효율과 1~2%의 사이에서 일치하는 값을 보이고 있

Table 1. Results of performance evaluation

성능 보증 항목	구 분	보증 조건	실측치	보정치 (낙차, 유량)	판정 결과
수차 출력 [kW]	최대출력	≥5,412	4,491	6,007	만족
	평균출력	≥3,866	3,482	4,327	만족
	최소출력	≥2,220	2,178	2,594	만족

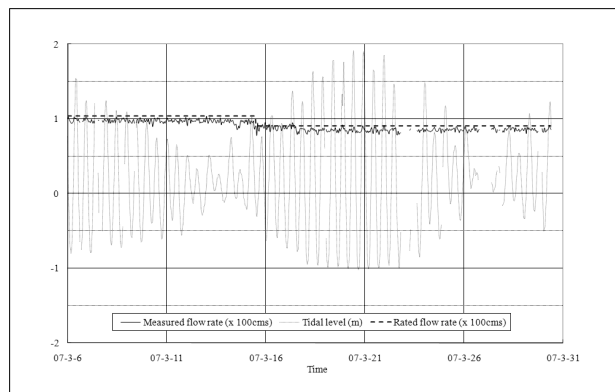


Fig. 3 Measured and rated flow rate of circulating water

었다. 즉, 소수력 발전소에서 실측한 유량 자료보다 CWP 특성으로부터 산출한 유량 자료가 더욱 정확한 것으로 판단된다.

소수력발전시스템의 성능평가에서 가장 중요한 것은 발전 출력 및 효율이라고 할 수 있다. 발전출력을 산정하는 식은 다음과 같다.

$$P = 9.8 \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot \rho \cdot Q \cdot E \quad (1)$$

여기서, P는 발전출력(kW), η_T 는 수차효율, η_G 는 발전기 효율, ρ 는 해수밀도($1,025\text{kg/m}^3$), Q는 사용수량으로 정격유량 또는 실측유량(cms), E는 유효낙차(m)이다.

식 (1)에서 알 수 있듯이 수력발전시스템의 성능평가를 위해서는 댐 상류의 수위 및 댐 하류의 수위자료를 이용하여 유효낙차를 측정하고, 유량환산이 가능한 지점의 수위를 측정하여 유량을 실측하는 과정이 수행되어야 한다. 유량을 측정하는 또 다른 방법은 CWP의 가동대수를 확인하는 것인데 이는 CWP의 가동대수에 따라 어느 정도 뚜렷한 유량의 변화패턴이 발생하기 때문이다.

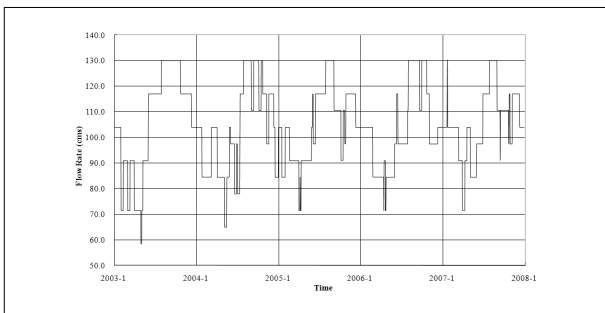


Fig. 4 Rated flow rate of circulating water

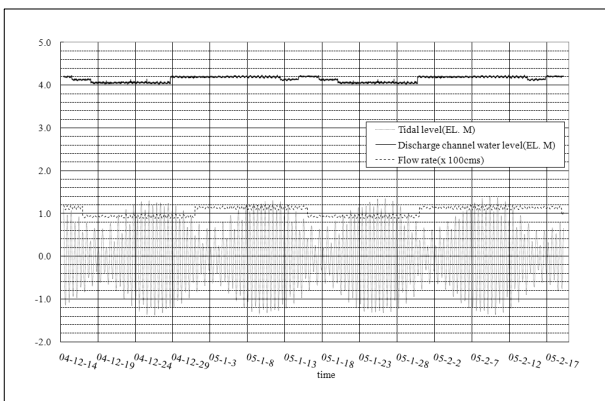


Fig. 5 Flow rate variation with tidal height change

Fig. 4는 2003년부터 2008년까지 5년간 삼천포화력의 호기별 가동정지 기간과 CWP의 가동대수를 이용하여 냉각수량(유량)을 파악한 것이다. Fig. 5와 같이 이를 배수로 수위 관측 결과와 비교해보면, 유량변화가 수위변화 경향과 정확히 일치함을 확인할 수 있다. 또한, 삼천포화력발전소 전면 해역의 조위 관측 자료를 조화분석한 결과와 냉각수량의 변화양상을 비교해 보면 규칙적인패턴을 보이고 있다. 즉, 냉각수 순환수 펌프는 저조시 유량이 적고, 고조시 유량이 증가하는데 이에 따라 고조시의 배수로 수위가 저조시 보다 높은 경향이 나타나며 이는 조위와 연동되는 뚜렷한 패턴을 보이고 있다. 따라서, CWP의 운전실적과 조위자료를 이용한 계산 유량이 비교적 정확한 유량 자료로 판단되었으며, 본 연구에서 성능평가에 이 자료를 이용하였다.

또한, 조위 변화와 출력, 효율과의 관계를 살펴보면 Fig. 6과 같이 간조 시 최대출력, 만조 시 최저출력을 보이고 효율 역시 간조 시 최대효율, 만조 시 최저효율을 보이고 있다.

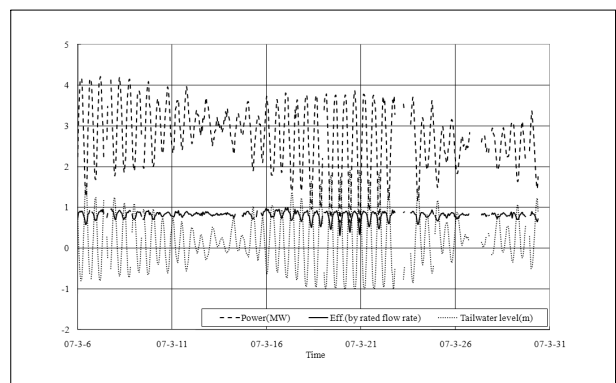


Fig. 6 Tidal level vs. power and efficiency

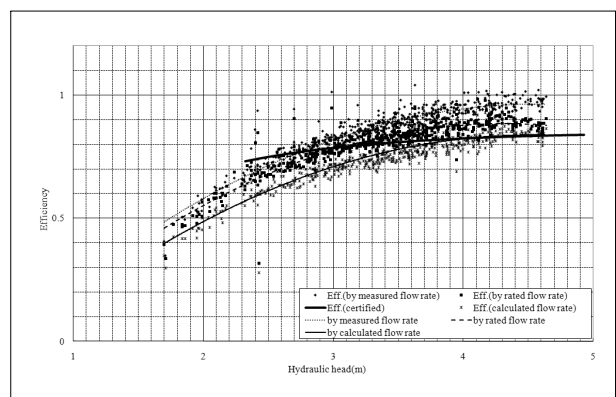


Fig. 7 head vs. efficiency

낙차에 따른 출력, 효율 실측 결과를 살펴보면, Fig. 7과 같이 삼천포 화력 소수력 수차는 설계사 보증치와 다소 차이가 있음을 발견하였다. 고낙차일때는 보증치보다 효율이 높고, 3m 이하의 저낙차일때는 보증치보다 효율이 낮게 나타나고 있었다. 출력 또한 동일한 특성을 보이고 있었다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 실측유량을 적용할 경우는 효율이 비정상적으로 높으며, 실제유량에 보다 가까운 계산유량을 적용할 경우는 저낙차 구간에서 보증치 이하의 효율값을 보이고 있었다. 한편, 유량에 대해서는 정격유량에서 효율이 최대값을 보였으며, 각각의 낙차에 대하여 사용수량의 범위가 일정한 범위로 나타나 변유량-변낙차 운전을 하고 있음을 확인하였다⁽⁶⁾.

소수력 수차 6개호기의 5개월 간 가동자료를 이용하여 수차성능곡선을 산출한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 조위조건을 고려한 계산유량을 이용하였으며, 고출력에서는 효율이 보증치를 상회하지만 저출력에서는 보증치를 이하를 나타내었다. 전체적으로 삼천포 해양소수력발전시스템은 효율 측면에서 비교적 양호한 상태로 판단된다.

3. 최적운전방안 수립

앞서 살펴본 바와 같이 삼천포 해양 소수력은 최대낙차에서 최대효율을 갖고 정격유량에서 최대 출력값을 보이고 있다. 따라서, 소수력 발전 시 최고의 성능을 발휘하기 위해서는 정격유량에 가까운 범위에서 최대낙차를 확보하는 방향으로 운전을 해야 한다. 즉, 화력발전소의 냉각수량에 맞추어 소수력의 가동 호기수를 조절하는 것이 유리하다. 즉, 냉각수량이 감소하여 소수력 단위 호기당 유량이 정격유량 이하로 크게 떨어질 경우에는 소수력의 가동 호기수를 줄이는 것이

Table 2. Distribution of rated flow rate of circulating water (03.01~07.12)

정격 냉각수량 (cms)	빈도 (%)	정격 냉각수량 (cms)	빈도 (%)
130.0	15.9	84.5	12.7
117.0	18.6	78.0	1.0
110.5	6.7	71.5	4.3
104.0	19.6	65.0	0.5
97.5	9.8	58.5	0.2
91.0	10.6		

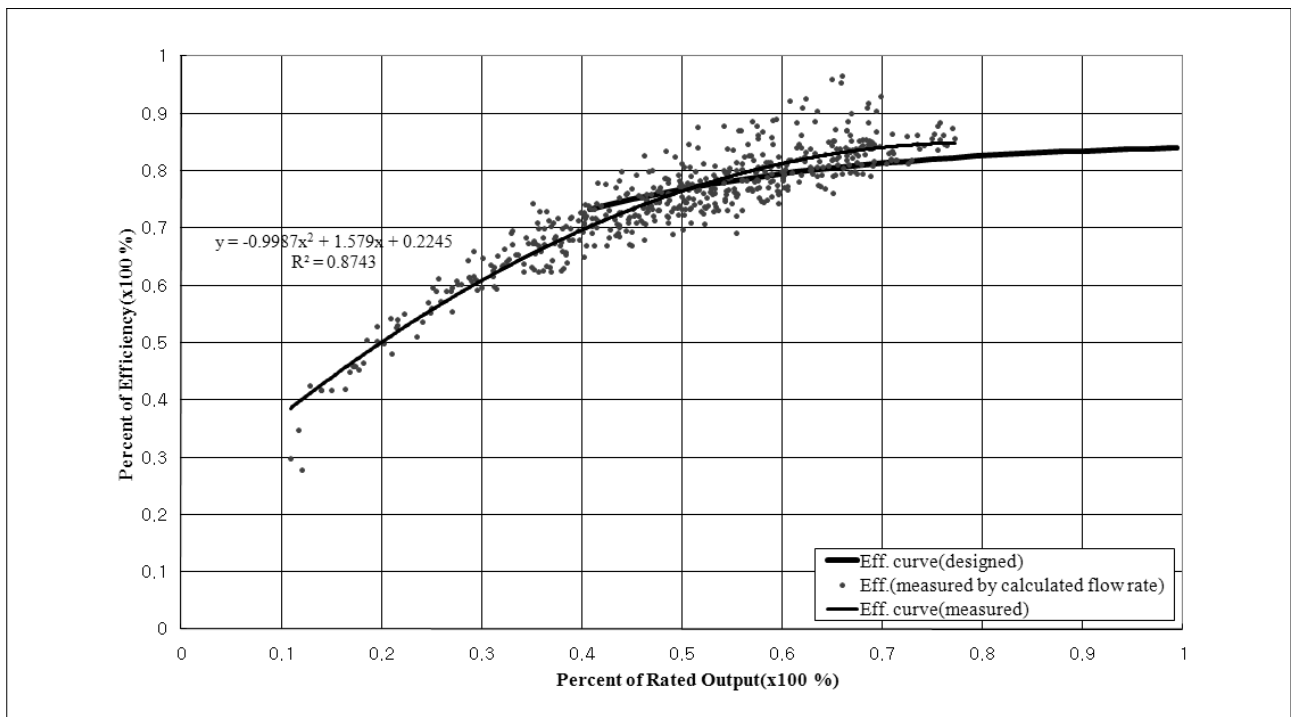


Fig. 8 Efficiency curve of hydraulic turbine

적절하다.

2003년부터 2007년까지의 CWP의 운전실적을 이용하여 각각의 유량조건에서의 최적 운전방안을 도출하였다. 운전시 정격 냉각수량분포는 Table 2와 같고, 동계에 유량이 적고 하계에 유량이 많으며 100cms 이상의 유량이 60% 정도를 차지한다.

Table 2의 자료를 바탕으로 빈도수가 높은 대표적인 유량을 선택하여 계절적 변화를 포함하는 최적운전방안을 도출하였다. 먼저 최대 출력모드로 운전하는 조건을 선정하고 이에 대한 운전특성을 검토하였다. 이는 현재 발전소의 운전상태로서 배수로 위어의 불완전 월류구조에 의한 하류의 수위변화가 바로 Seal well 위어까지 영향을 주는 운전조건이다. 위어의 수위는 Fig. 2의 회귀식을 사용하였으며 6호기 Seal well의 수위는 삼천포 5,6호기 순환수계통 설계서⁽⁶⁾의 수위에 소수력 운전에 따른 수위 증가분을 반영하였다. CWP의 동력증가량은 1~6호기 각각의 CWP 성능곡선으로부터 양정고 변화에 따른 Brake Horse Power의 변화량으로 계산하였다. 이에 대한 결과값은 Table 3를 통하여 확인할 수 있다.

Table 3. Suggestion for optimum operation conditions based on the accumulated operation data

운전 조건	특성	정격 유량 (cms)	CWP 가동대수			댐 수위 (m)	유효 출력 (kW)
			1,2 호기	3,4 호기	5,6호 기		
최대 출력 Mode1	불완전 월류	71,5	2	4	2	3,60	2189,18
		84,5	4	2	4	3,60	2565,48
		104	4	4	2	3,60	3151,37
		117	4	4	6	3,60	3466,67
		130	4	4	8	3,60	3811,88
		156,2	4	4	8	3,60	4591,77
안전 운전 Mode2	완전 월류	71,5	2	4	2	3,23	2089,21
		84,5	4	2	4	3,27	2498,89
		104	4	4	2	3,33	3130,62
		117	4	4	6	3,37	3563,24
		130	4	4	8	3,40	4005,04
		156,2	4	4	8	3,48	4923,31
최적 운전	Mode1	71,5	2	4	2	3,60	2189,18
		84,5	4	2	4	3,60	2565,48
		104	4	4	2	3,60	3151,37
	Mode2	117	4	4	6	3,37	3563,24
		130	4	4	8	3,40	4005,04
		156,2	4	4	8	3,48	4923,31

또한, 최대출력 모드와 더불어 안전모드로 운전하는 조건에서의 운전특성을 파악하였다. 안전모드 운전이란 완전월류 조건을 유지하기 위하여 배수로 위어의 수위를 소수력 건설 이전상태로 유지하는 운전상태를 말한다. 이를 위해서는 소수력 운전수위를 냉각수량의 변화에 따라 현재상태(EL, 3.6m)보다 낮게 유지해야 한다. 결과적으로 상기 조건에서는 배수로 상류의 수위상승 및 CWP의 동력증가가 발생하지 않는다. Table 3에서 유효출력은 평균해수면 기준 출력인 평균출력에서 CWP의 동력증가량을 뺀 값으로 해양소수력에 의한 순발전량이다.

두 가지 운전조건에 대한 비교 결과, 104cms 이하의 저 유량 조건에서는 최대출력모드가 안전모드보다 유효출력이 높았으나 117cms 이상의 고 유량 조건에서는 안전모드의 유효출력이 오히려 높게 나타났다. 즉, 고 유량 조건에서는 설계 운전 수위인 E.L. 3.6m보다 낮게 운전하는 것이 합리적임을 알 수 있다. 두 가지 조건에서의 운전상태를 검토하고 각각의 유량에 대한 최적운전조건을 Table 3에 제시하였다.

4. 결론

세계 최초로 상용화된 삼천포 해양소수력 발전소의 5개월간 운전실적 자료와 약 3년간의 수위, 조위 및 방류량의 관측 자료를 이용하여 성능평가를 시행하였으며, 발전소의 최적 운영방안을 도출하였다.

삼천포 해양 소수력의 운전실적 분석 결과, 수위 측면에서는 최대낙차에서 최대효율을 갖고 유량은 정격유량에서 효율이 최대치를 보이고 있었다. 따라서, 삼천포 해양 소수력의 최대성능을 확보하기 위해서는 정격유량에 가까운 범위에서 최대낙차를 확보하는 방향으로 운전을 해야 하는 것으로 분석되었다. 또한, 현재 배수로 수위가 불안정한 상태이므로 이의 개선이 필요하며, 유량에 따라 운전모드의 변경이 필요함을 확인하였다.

References

[1] 강금석, 김지영, 조흥연, 2007, "운전실적자료를 이용한 삼천

포 해양소수력 성능평가”, 한국신재생에너지학회 춘계학술대회 논문집, pp. 403-406.

- [2] 조흥연, 김정대, 정신태, 강금석, 2006, “소수력발전소 건설에 의한 삼천포 화력발전소 방류수로 흐름변화 예측”, 한국해안해양공학회지, 제18권, 제4호, pp.338-347.
- [3] 조흥연, 정신태, 강금석, 2006, “삼천포 화력발전소 방류수로 및 방류해역의 흐름관측 및 특성 분석”, 한국해안해양공학회

지, 제18권, 제4호, pp. 329-337.

- [4] 조흥연, 조범준, 강금석, 2007, “삼천포 해양소수력 성능평가”, 한국신재생에너지학회 춘계학술대회 논문집, pp. 617-620.
- [5] 한국전력공사, 1996, 삼천포화력 5,6호기 설계기술 용역, 순환수계통 설계서(최종본), 87900-C466-001(0-280-C3316-001).
- [6] 한전전력연구원, 2007, 발전소 온배수를 이용한 1,500kW급 수력발전 상용화기술 개발(최종보고서), 산업자원부.

강 금 석



1993년 서울대학교 토목공학과 공학사
1995년 서울대학교 토목공학과 공학석사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원
(E-mail : gldstn@kepri.re.kr)

김 지 영



2003년 경북대학교 토목공학과 공학사
2005년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학석사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 선임보연구원
(E-mail : jykim77@kepri.re.kr)

유 무 성



1997년 서울대학교 토목공학과 공학사
2005년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학석사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원
(E-mail : faust001@kepri.re.kr)