

모델분석을 통한 하수처리장 소수력발전 경제성 평가

Feasibility Study of small hydropower at a municipal wastewater treatment plant by model analysis

김원경**, 김동수*, 강지훈*, 채규정*, 김정연**, 이철형***, 박완순***
*Wonkyoung Kim**, Dongsoo Kim*, Jihoon Kang*, Kyujung Chae*, Jungyeon Kim**, Chulhyung Lee***, Wansoon Park****

요 지

본 연구는 경기도 용인시에 위치한 공공하수처리장을 대상으로 소수력발전 성능특성을 예측하고 경제성을 분석하여 소수력발전소의 건설타당성을 제시하였다. 방류구에서의 수준측량 조사에 따르면 실제 유효 낙차는 4.3m로 나타났다. 최근 5년간 방류량 자료를 살펴보면 일평균 실제 처리량은 약 30,000 m³/day로 나타났으며, 우수 유입과 물 사용량이 증가하는 여름 및 가을에 처리량이 증가하였다. 설계유량은 유량변화에 따른 누적 확률밀도와 유량지속곡선에 근거해 산정하였으며, 시간빈도로 보았을 때 17%의 유량이 지속되는 0.35 m³/sec가 설계유량으로 나타났다. 예상되는 수차 발전용량은 11kW급이며, 시스템 가동율은 74%, 그리고 계통선에 송출될 수 있는 연 전력생산량은 71.3MWh로 나타났다. 경제성 평가는 신재생에너지 경제성 분석 도구인 RETScreen 프로그램을 사용하여 B/C ratio, IRR, 개발투자비 등의 경제성 평가지표들을 산정하였다. 편익(Benefit) 산정시 전력기준단가는 133.67원/kWh, 할인율 7%를 적용하였으며, 비용(Cost) 산정시 유지관리비는 초기 건설비의 1%, 사용연한 30년을 적용하였다. 경제성 분석결과 기흥레스피아의 소수력발전소 건설시 초기 건설공사비가 \$165,000 일 때, B/C 1.0, NPV \$3,534, 투자회수기간 15.1년으로 산정되었고 따라서 초기 건설비용이 \$165,000 이하일 때 가장 경제적인 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 소수력, 하수처리장, 유량지속곡선, 유효낙차, 경제성 분석

1. 서론

에너지 다소비원인 공공하수처리시설은 기후협약에 따른 온실가스 저감시설로서의 그 역할이 증대되고 있다. 환경부는 ‘하수처리시설 에너지 자립화 계획(환경부, 2010)을 통해 2015년까지 에너지 자립율 18%를 목표로 하고 있으며, 이를 위해서는 소화가스를 제외한 신재생에너지 및 미활용에너지(태양광, 소수력, 풍력, 하수열)를 이용한 능동적 에너지 생산이 필요하다. 그 중 소수력발전은 공급 안정성이 우수하고 장기적으로 보면 발전가격이 안정적이다(에너지관리공단 신재생에너지센터, 2008). 특히 소수력발전은 이산화탄소의 배출이 거의 없는 청정에너지원으로서, 일정한 처리수가 방류되는 하수처리장에 적용되었을 때 그 가동율은 하천수보다 높다. 또한 기존 토목구조물을 이용하므로 일반 하천에 건설되는 소수력발전소와 달리 댐건설 등에 소요되는 토목공사비가 거의 없어 초기투자비가 저감되며, 유지관리비가 적게 소요되는 장점이 있다.

본 연구에서는 경기도 용인시에 위치한 공공하수처리장을 대상으로 수행된 현장조사 결과를 바탕으로 소수력발전 성능특성을 예측하고 이에 따른 개발투자비, 발전단가 및 투자비회수기간 등의 경제성을 분석하여 하수처리장 내 소수력발전의 건설타당성을 제시하고자 한다.

* 정회원·코오롱글로벌R&BDCenter 주임/선임/책임연구원·Email: kangji98@kolon.com, ckj@kolon.com, sdang791@kolon.com
** 비회원·한라건설 기술연구센터 선임/책임연구원·Email: kimwk@halla.co.kr, marito@halla.co.kr
*** 정회원·한국에너지기술연구원 책임/책임연구원·Email: lchg@kier.re.kr, pwsn@kier.re.kr

2. 연구방법

2.1 대상 하수처리장

경기도 용인시 기흥구 하갈동에 위치한 기흥레스피아는 2005년 7월부터 시설 운영을 시작하였다. 하수처리시설 면적은 8,4884m²이며, B3(Bio Best Bacillus)공법이 적용되어 50,000톤/일의 하수를 처리하도록 설계되었다. 대상 하수처리장은 축구장, 테니스장, 농구장, 이벤트장 등의 주민편의시설을 갖추고 있으며, 실제 하수처리시설은 지하에 위치해 있다. 처리된 방류수는 그림 1의 ③, ④, ⑤를 거쳐 그림 2에 나타낸 바와 같이 신갈저수지로 유입된다.



그림 1. 기흥 레스피아 조감도



그림 2. 방류구 위치

2.2 소수력발전 성능평가

하수처리장에 소수력발전소를 설치하고 성능특성을 파악하기 위해서는 하수처리공정에 지장을 초래하지 않고 계획된 하수처리량을 원활히 방류시키면서 소수력발전이 가능할 수 있도록 기술적인 특성분석이 필요하며, 이를 통하여 가장 적합한 발전규모, 발전소의 연평균가동율 및 연간발전량 등을 예측할 수 있다.

이러한 성능특성들을 파악하기 위해서 먼저 현장 수준측량을 통하여 월류보 상단에서 최종 방류구까지의 고도(Elevation)를 측정하였으며, 최근 5년간(2007년~2011년)의 방류량 수문자료를 분석하였다.

소수력발전소에서의 단위시간당 생산되는 평균 발전량 L_f 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 그 외에 소수력발전소의 설비용량 C , 연평균가동율 L_f 그리고 연간발전량 E_a 는 식 (2)~(4)와 같다.

$$P_e = \rho g H_e \eta_s \left(\int_0^{Q_r} Q P(Q) dQ + Q_r \int_{Q_r}^{\infty} P(Q) dQ \right) \quad (1)$$

$$= \rho g H_e \eta_s (S_1 + S_2)$$

$$C = \rho g H_e Q_r \quad (2)$$

$$L_f = (S_1 + S_2) / Q_r \quad (3)$$

$$E_a = 8,760 C L_f \quad (4)$$

2.3 경제성 분석

경제성 분석이란 사업의 계획단계 또는 사후에 사업에 대한 경제적 타당성을 분석, 평가하는 것을 말하며, 일반적으로 편익·비용분석(Benefit cost analysis)이 사용된다. 비용·편익비는 어느 시점으로 할인된 편익과 비용의 율로서, 통상 B/C값이 1.0보다 크면 경제성이 높은 것으로 평가되고 그보다 작으면 경제성이 낮은 것으로 평가한다. 그 외의 경제성 분석 지표로는 순현재가(NPV; Net Present Value), 내부수익률(IRR; Internal Rate of Return) 등이 사용되는데, 이러한 평가지표들은 사업성을 평가하는데 상호 배타적인 개념이 아니라 보완적인 기준으로 사용된다.

일반적으로 하수처리장에 소수력발전소를 건설하기 위해 소요되는 총투자비용은 크게 초기비용과 연간비용으로 구분된다. 초기비용은 다시 직접비용과 간접비용으로 구분되는데, 직접비용으로는 수차발전기 및 부속설비비, 배전반 및 제어설비비, 방수로 토목설비비, 웨어수문설비비 등이 포함되고, 간접비용으로는 조사비, 설계비 등이 해당된다. 유지관리비 등과 같이 매년 운영중 발생하는 비용이 연간비용에 속한다.

본 연구에서는 경제성 평가를 위해 신재생에너지 경제성 분석도구 중에 하나인 캐나다의 RETScreen 프로그램을 사용하였으며, 이를 통해 발전단가, B/C ratio 등의 경제성 평가지표들을 산정하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 연 발전량 산정

소수력발전소의 설비용량은 유량과 유효낙차에 의해 결정된다. 유효낙차는 최대사용낙차에서 취수구, 밸브, 수압관, 방수로 및 수로에서의 손실을 제외한 것으로 표시된다. 일반적으로 수로에서의 손실을 제외한 제손실은 최대사용낙차의 5%로 가정하므로 유효낙차는 식 5와 같이 표시된다.

$$H_g - H_l \quad (5)$$

기흥레스피아 하수처리장의 소수력발전을 위한 취수용 보는 방류구 바닥레벨에 보상단을 맞추어 약 0.3m 높이의 월류보를 설치하고, 측면에 수압관을 연결하여 취수하는 형태로 계획하였다. 수준측량을 통해 이들의 Elevation을 측정하고 유효낙차를 산정한 결과는 표 1과 같다.

표 1. 유효낙차 산정 결과

구 분	월류보상단 수위	최종방류구 수위	최대사용낙차 (H_g)	손실낙차 (H_l)	유효낙차 (H_e)
Elevation	49.8m	45.2m	4.6m	3.0m	4.3m

기흥레스피아 하수처리장의 처리수를 이용하여 방류구에 소수력발전소를 건설하는 것으로 계획하였으며, 사용유량을 결정하기 위해 최근 5년간의 하수처리량을 월별, 일별 및 시간별로 분석하였다. 분석결과 기흥레스피아 일 평균 실제 처리량은 약 30,000m³/일로서 연평균 일 하수처리량과 유량변화에 따른 누적밀도는 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었고, 누적밀도함수를 통해 산정된 유량지속곡선은 그림 5에 나타내었다.

그림 6은 설계유량의 변화에 따른 연 평균가동율, 설비용량 및 연간발전량의 변화를 나타내는 그림이다. 이 때 발전소의 총효율은 0.8로 가정하였고, 낙차는 단위 유효낙차(1m)를 적용하였다.

일반적으로 소수력발전소의 설비용량은 설계유량 변화에 따라 거의 선형적으로 변하게 된다. 그러나 연

평균가동율은 설계유량이 증가함에 따라 감소하게 되며, 또한 설계유량이 작은 영역에서는 완만하게, 큰 영역에서는 급하게 감소한다. 이러한 현상은 설계유량이 작을 경우가 큰 경우보다 단위시간당 시스템에서 얻을 수 있는 평균발전량이 설비용량에 비해 상대적으로 크기 때문이다.

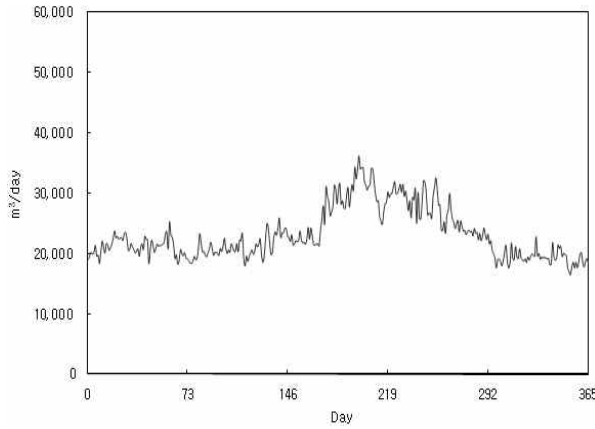


그림 1. 유량변화에 따른 누적밀도의 변화

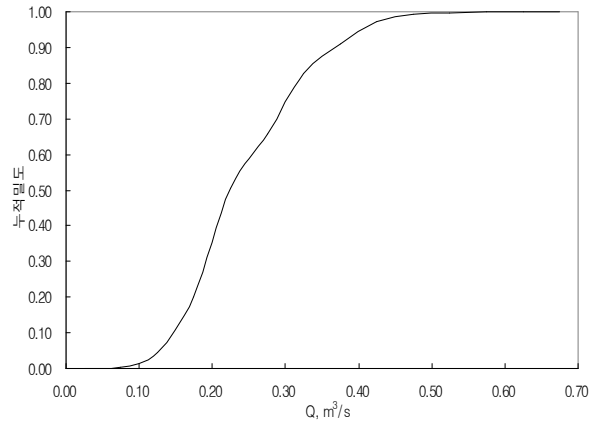


그림 4. 유량변화에 따른 누적밀도의 변화

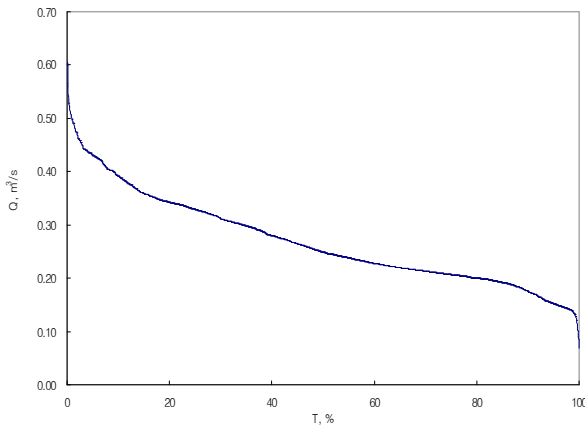


그림 5. 유량지속곡선 (T:시간빈도)

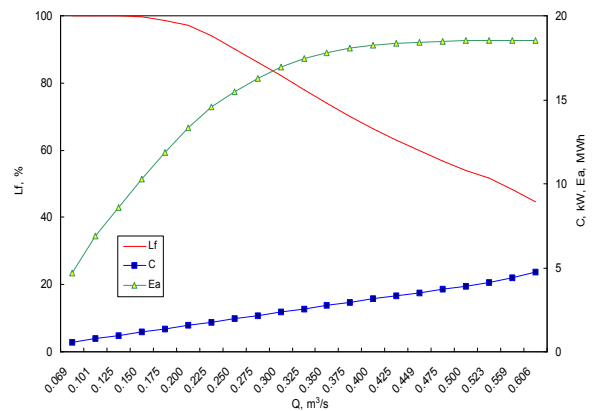


그림 6. 유량변화에 따른 가동율(Lr), 설비용량(C), 연간발전량(Ea)의 변화

연간 전력생산량은 설계유량이 증가함에 따라 증가하게 되며, 설계유량이 점차 커지면 증가율이 서서히 둔화된다. 이러한 현상은 설계유량이 커짐에 따라 연 평균가동율이 점차 감소하기 때문이다.

표 2는 방류량 분석을 통해 소수력발전의 설계유량을 산정하고 유효낙차를 분석하여 소수력발전의 성능 특성을 산정한 결과를 보여준다.

표 2. 소수력발전소 설계제원 및 성능요약

구 분	설계유량 (m³/s)	유효낙차 (m)	설비용량 (kW)	연간발전량 (MWh)	가동율 (%)
성능특성	0.35	4.3	11.0	71.3	74

3.3 소수력발전 건설타당성 평가

경제성 분석시 편익(Benefit)을 산정하기 위해 전력기준단가는 변동요금인 전력거래소 계통한계가격(SMP)의 2011년도 가격을 반영한 133.67원/kWh, 전력기준단가 상승률은 5%, 할인율은 신재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS 제도와 연계방안(2006)에서 제시한 7%를 적용하였다.

비용(Cost)은 앞선 언급한 바와 같이 초기 건설비용과 유지관리비용으로 구성되는데, 유지관리비용은 초기 건설비용의 1%로 가정하였고, 사용연한은 하수처리장 토목구조물의 사용연한 30년을 적용하였으며, 그 외에 연료가격 상승률과 인플레이션은 고려하지 않았다.

표 3과 같이 RETScreen을 이용한 경제성 분석결과, 초기 건설비용이 \$165,000 일 때, B/C 1.0, NPV \$3,534, IRR 7.2%, 자기자본회수 15.1년으로 산정되었다. 따라서 기흥레스피아에 소수력발전소 건설시 수차발전기를 포함한 건설공사 비용은 \$165,000 이하일 때 가장 경제성이 있는 것으로 파악되었다.

표 3. 경제성 분석 결과

초기 건설비용(\$)	B/C	NPV(\$)	IRR(%)	자기자본회수(년)
205,000	0.80	-41,429	5.4	17.8
185,000	0.90	-18,947	6.2	16.4
165,000	1.02	3,534	7.2	15.1
145,000	1.18	26,016	8.3	13.6

4. 결론

본 연구를 통하여 기흥레스피아의 처리수를 이용한 소수력 발전의 성능특성 분석과 경제성을 평가해 보았다. 그 결과 설비용량 11kW, 연간 발전량 71.3MWh, 가동율 74%로 산정되었으며, 초기 건설비용이 \$165,000 이하일 때 사업의 타당성이 있는 것으로 파악되었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업” 으로 지원받은 과제임(과제번호:GT-11-B-01-010-0)

참고 문헌

1. 박완순, 이철형(2001). 소수력발전 성능특성 분석기법 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 제21권 제1호, pp. 21-25
2. 박완순, 이철형, 정상만(1998). 소수력발전소의 건설 타당성분석 기법, 한국태양에너지학회 논문집, 제18권 제3호, pp. 153-160
3. 김길호, 이충성, 이전희, 심명필(2007). 경제성분석에 의한 소수력 개발의 최적규모 결정 방안, 한국수자원학회 논문집, 제40권 제12호, pp. 995-1005
4. 우재열, 김진수, 장 훈, 김영현(2011). 농업용 저수지의 소수력 개발을 위한 경제성 분석, 한국농공학회 논문집, 제53권 제2호, pp. 53-60
5. Natural Resources Canada(2004). "RETScreen manual book". (<http://www.retscreen.net>)
6. 대구경북개발연구원(2002). 신천하수종말처리시설 소수력발전 적용 검토
7. 환경부(2010). 하수처리시설 에너지 자립화 기본계획, 환경부 생활하수과.
8. 에너지관리공단 신재생에너지센터(2008). 신재생에너지 R&D 전략 2030 시리즈: 소수력. 북스힐.