

## 하수처리수를 이용한 소수력발전소 설계 및 성능예측

이철형\*, 박완순\*, 김원경\*\*, 김정연\*\*, 채규정\*\*\*

\* 한국에너지기술연구원(lchg@kier.re.kr, pwsn@kier.re.kr)  
\*\* 한라건설(주) 기술연구소(kimwk@halla.co.kr, marito@halla.co.kr)  
\*\*\* 코오롱글로벌(주) R&BD센터 환경기술연구소(ckj@kolon.com)

### Design and Performance Prediction of Small Hydropower Plant Using Treated Effluent in Wastewater Treatment Plant

Lee, Chul-Hyung\*, Park, Wan-Soon\*, Kim, Won-Kyoung\*\*, Kim, Jeong-Yeon\*\*,  
Chae, Kyu-Jung\*\*\*

\* Korea Institute of Energy Research(lchg@kier.re.kr, pwsn@kier.re.kr)  
\*\* R&D Center, Halla E&C(kimwk@halla.co.kr, marito@halla.co.kr)  
\*\*\* Environmental Technology Research Lab., R&BD Center, Kolon Global Corp(ckj@kolon.com)

#### Abstract

A methodology to predict the output performance of small hydro power plant using treated effluent in waste water treatment plant has been studied. Existing waste water treatment plant located in Kyunggi-Do were selected and the output performance characteristics for these plants were analyzed. Based on the models developed in this study, the hydrologic performance characteristics for SHP sites have been analyzed. The results show that the flow duration characteristics of small hydropower plant for waste water treatment plant have quite differences compared with small hydropower plant for the river. As a result, it was found that the developed model in this study can be used to analyze the output characteristics for small hydro power in waste water treatment plant. Additionally, primary design specifications such as design flowrate, capacity, operational rate and annual electricity production were estimated and discussed. It was found that the models developed in this study can be used to decide the design performance of small hydropower plant for waste water treatment plant effectively.

Keywords : Wastewater treatment plant(하수처리장), Small hydropower plant(소수력발전소), Design performance(설계성능), Installed capacity(시설용량), Annual operational rate(연간가동율)

### 기 호 설 명

- $C$  : Installed capacity( $kW$ )
- $D(Q)$  : Flow duration function
- $E_a$  : Annual electricity production( $kWh$ )
- $F(Q)$  : Cumulative density function
- $g$  : Gravitational acceleration( $m/s^2$ )
- $H$  : Head( $m$ )
- $H_e$  : Effective head( $m$ )
- $L_f$  : Load factor(%)
- $P_a$  : Power per unit time( $kWh$ )
- $P_i$  : Hydro power( $kWh$ )
- $P_1$  : Partial Power( $kWh$ )
- $P_2$  : Rated power( $kWh$ )
- $Q$  : Flowrate( $m^3/s$ )
- $Q_r$  : Design flowrate( $m^3/s$ )
- $\rho$  : Water density( $kg/m^3$ )
- $\eta$  : Efficiency

### 1. 서 론

문명의 발달과 인간의 생활이 윤택해짐에 따라 산업체와 개인별 사용하는 물의 양이 증가함에 따라 하수의 양도 증가하고 있다. 최근 하수처리량의 증가로 인해 하수처리장에서 사용하는 에너지의 중요성이 재인식되고 있다.

에너지 다소비원인 하수처리시설은 기후협약에 따른 온실가스 저감시설로서의 그 역할이 증대되고 있다. 환경부는 ‘하수처리시설 에너지 자립화 계획’을 통해 2015년까지 에너지 자립율 18%를 목표로 하고 있으며<sup>(1)</sup>, 이를 위해서는 미활용 에너지를 이용한 능동적 에너지 생산이 필요하다. 그 중 소수력발전은 공급 안정성이 우수하고 장기적으로 보면 발전가격이 안정적이다<sup>(2)</sup>. 특히 소수력발전은 일정한 처리수가 방류되는 하수처리장에 적용되었을 때 그 가동율은 하천에 설치되는 소수력발전소에 비하여 매우 높다고 알려져 있

으며<sup>(3)</sup>, 향후 하수처리장에 널리 보급될 수 있는 청정에너지원이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 경기도 용인시에 위치한 기흥레스피아 하수처리장을 대상으로 수행된 소수력 발전에 대해 분석하였다.

### 2. 소수력발전의 출력 특성

하수처리장의 처리수를 이용한 소수력발전은 월류댐을 갖는 일반 소수력발전과 마찬가지로 유량과 낙차로부터 에너지를 추출한다. Fig. 1은 월류댐을 갖는 소수력발전소의 경우, 단위 낙차, 단위시간당, 유량변화에 대한 출력의 변화를 나타내는 그림이다. 순수한 소수력에너지  $P_i$ 는 유량변화에 따라 선형적으로 변하게 되지만 소수력발전소의 출력  $P_a$ 는 발전소의 설계유량이 존재하기 때문에 특성이 바뀌게 된다<sup>(4)</sup>.

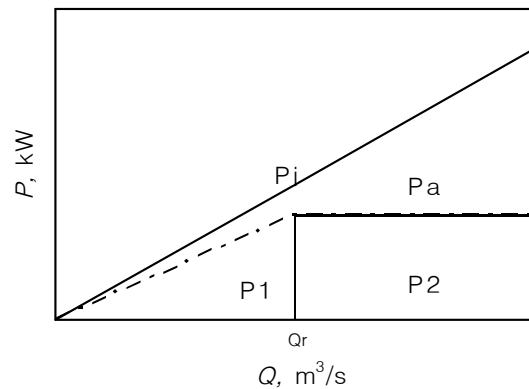


Fig. 1. Output characteristics of small hydropower plant.

소수력발전소의 출력은 설계유량 이하에서는 유량변화에 따라 거의 선형적으로 변하게 되지만, 발전설비의 효율로 인하여 순수한 소수력에너지보다 항상 적은 값을 갖는다. 또한 설계유량 이상에서는 설계유량에 해당하는 유량만을 사용하고 이를 초과하는 유량은 월류시켜 방류하기 때문에 출력은 일정하게 유지된다.

소수력발전소에서의 단위시간당 생산되는 평균발전량  $P_a$ 를 구하면 다음과 같다.

$$P_a = P_1 + P_2 \quad (1)$$

소수력발전소의 설비용량  $C$ , 연평균가동율  $L_f$  그리고 연간발전량  $E_a$ 는 다음과 같다.

$$C = \rho g H Q_r \eta \quad (2)$$

$$L_f = P_a / C_r \quad (3)$$

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

### 3. 결과 및 검토

본 연구에서 분석대상으로 선정된 기흥레스피아 하수처리장은 일처리량이 50,000m<sup>3</sup>으로 설계되어 있다.

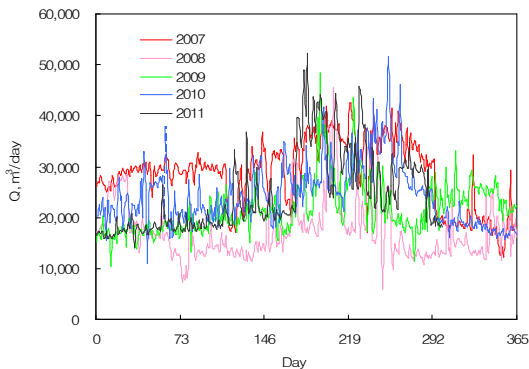


Fig. 2. Variation of daily treated effluent water for year.

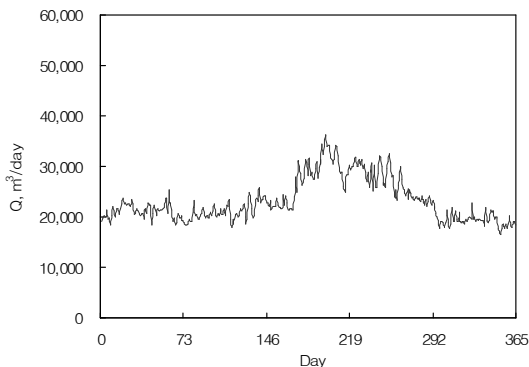


Fig. 3. Variation of average daily treated effluent water.

Fig. 2는 연도별 일 하수처리량의 변화를 보여준다. 일 하수처리량은 연도별로도 변화가 심하며, 계절적인 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 Fig. 2의 자료를 일별로 산술평균하여 표시한 것이다. Fig. 3을 통하여 일 하수처리량은 여름철에 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

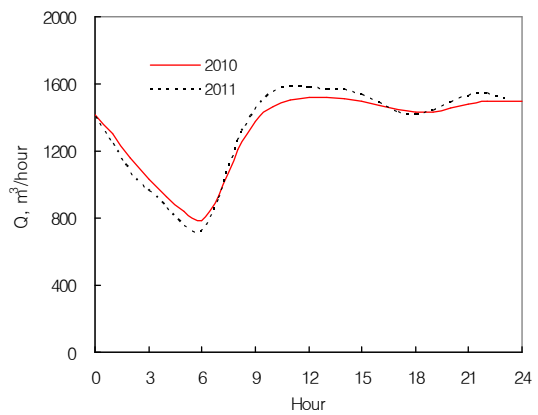


Fig. 4. Variation of hourly treated effluent water for year.

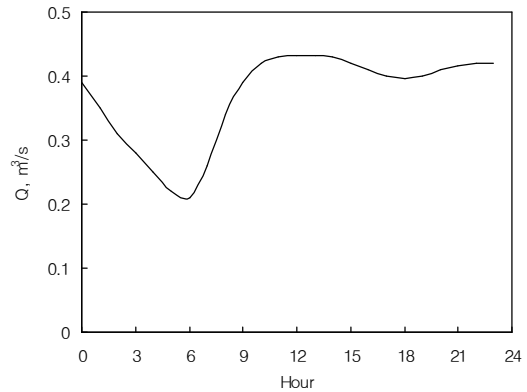


Fig. 5. Variation of average hourly treated effluent water.

Fig. 4는 기흥레스피아 하수처리장의 시간대별 하수처리량의 변화를 보여준다. 2010년과 2011년도의 동일한 날을 대상으로 분석한 결과, 하루 중 시간대별 하수처리량의 변화는 매우 비슷한 경향을 갖는다는 것을 알 수 있

다. 오후 12시를 기점으로 오전 6시경까지는 하수처리량이 감소하고 9시경 정도까지는 증가하며, 이후에는 비교적 일정하게 유지된다.

Fig. 5는 Fig. 4의 시간당 하수처리량을 산술평균하여 시간대별로 초당 유량으로 표시한 것이다.

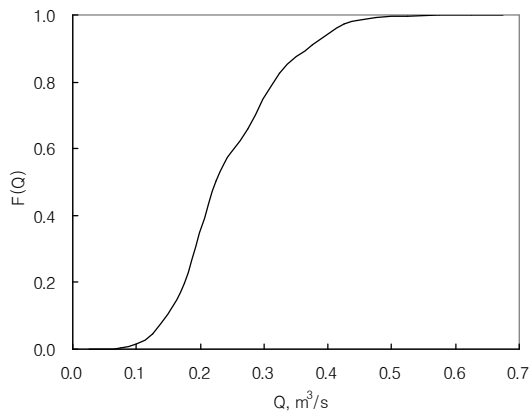


Fig. 6. Cumulative density characteristic of treated effluent water.

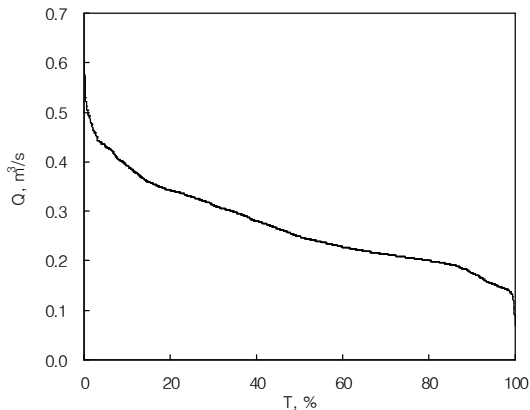


Fig. 7. Flow duration characteristic of waste water treatment plant.

하수처리장에서 처리되는 하수처리수의 방류량자료를 이용하여 누적밀도함수  $F(Q)$ 를 얻을 수 있다. Fig. 6은 Fig. 2의 방류량자료를 초당 유량으로 환산하고 등급별로 구분하여 크기별로 누적시킨 누적밀도분포를 나타내는 그림이다.

하수처리장의 방류량특성을 나타내는 유량지속특성은  $D(Q)=1-F(Q)$ 의 관계를 가지므로 하수처리장의 유량지속특성을 산정할 수 있다<sup>(5)</sup>. Fig. 7은 기흥레스피아 하수처리장의 유량지속곡선을 나타낸다.

하수처리수를 이용한 소수력발전소를 계획하기 위해서는 처리수의 단기변화와 장기변화를 모두 고려하여야 한다. 단기변화는 하루중 시간대별 유량변화이며, 장기변화는 연간 유량지속특성을 의미한다<sup>(6)</sup>. 하수처리수를 이용한 소수력발전은 하천에서의 소수력발전과는 다르게 설계되어야 한다. 하천에 건설되는 소수력발전소는 발전소용량이 크고 계절적, 또는 강우상태에 따라 유량변화가 크기 때문에 여러대의 수차발전기를 채택하여 유량변화에 대응한다. 이에 비하여 하수처리장에 건설되는 대부분의 소수력발전소는 용량이 작기 때문에 여러대의 수차발전기를 구비하지 못하고 수차발전기 한대가 유량변화에 능동적으로 대응하여야 한다. 기흥레스피아의 경우, 유량변화에 대응할 수 있는 수차로는 피치조절형 프로펠러수차가 적합하다.

Fig. 8은 설계유량의 변화에 따른 연평균가동율, 설비용량 및 연간 발전량의 변화를 나타내는 그림이다. 이 때 발전소의 총효율은 0.75로 가정하였고, 낙차는 단위 유효낙차를 적용하였다.

소수력발전소의 설비용량은 설계유량 변화에 따라 선형적으로 변하게 된다. 연 평균가동율은 설계유량이 증가할 수록 감소하며, 설계유량이 작은 영역에서는 서서히, 큰 영역에서는 급히 감소하게 된다. 이러한 현상은 일반하천에 건설되는 소수력발전소의 성능특성과는 전혀 다른 현상으로, 하수처리장의 유량지속특성이 하천과는 크게 다르기 때문에 나타나는 현상이다<sup>(7)</sup>. 연간발전량은 설계유량이 증가함에 따라 증가하게 되며, 설계유량이 점차 커지면 증가율이 서서히 둔화된다. 이러한 현상은 설계유량이 커짐에 따라 설비용량은

선형적으로 증가하지만 연평균가동율이 점차 감소하기 때문이다.

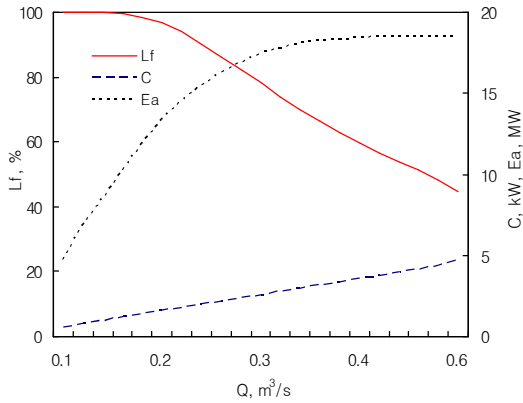


Fig. 8. Variation of capacity, load factor and annual electricity production with design flowrate.

기흥레스피아 하수처리장의 경우, 설계유량을  $0.35\text{m}^3/\text{s}$ 으로 선정하면, 설비가동율은 74%이며, 연간발전량은 16.6 MWh로 산정된다.

하수처리장의 소수력발전 가능성을 검토하기 위해서는 하수처리장의 본래의 목적인 하수처리공정에 지장을 초래하지 않고 계획된 하수처리량을 원활히 방류시키면서 소수력발전이 가능할 수 있도록 기술적인 특성분석이 필요하다. 또한 이를 통하여 각 하수처리장에 적합한 발전규모, 발전소의 연평균가동율 및 연간발전량 등을 예측하여야 한다.

Fig. 9는 기흥레스피아 하수처리장의 방류구에서 낙차를 산정하기 위해 측량한 결과를 보여준다. 방류구의 표고는 94.404m이며 방류수면의 표고는 89.912m로 사용할 수 있는 총낙차는 4.619m로 산정되었다. 사용낙차를 증가시키기 위하여 방류구의 높이를 인위적으로 높이는 것을 검토하였으나, 이럴 경우 방류구 전단의 처리공정에서 문제가 발생하는 것으로 판명되어 방류구의 낙차를 현상태로 유지하여 자연적인 낙차만을 이용하는 방안을 채택하였다.



Fig. 9. Measured head at discharge.



Fig. 10. Photograph of discharge.

Fig. 10은 방류구의 사진으로 방류된 물은 신갈천으로 합류하게 된다. 방류구 주변의 지형과 시설물이 일반적인 소수력발전소를 건설하기 어려운 여건이라 수압관을 지상에 노출되도록 구상하였다. 또한 방류구 주변의 시설물들을 보전하고 발전소를 건설하기 위하여 사이폰 형상의 수압관을 갖는 댐-수로식 소수력발전소의 형태를 택하였다.

Table 1. Summary of design performance of small hydropower for waste water treatment plant.

Specification	Content
Design flowrate, $Q_r$	$0.35\text{m}^3/\text{s}$
Effective head, $H_e$	4.3m
Installed capacity, C	11.0kW
Annual electricity production, $E_a$	71.3MWh
Annual load factor, $L_f$	74%

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 하수처리장의 처리수를 이용한 소수력발전의 성능특성을 예측하는 방법이 제시되었다. 개발된 모델은 하수처리장의 방류수를 이용한 소수력발전소의 성능특성을 잘 표현하여 준다는 것이 밝혀졌다. 하수처리수는 비교적 일정한 방류량을 가졌다고 알려져 있으나, 시간별, 일별, 계절별 변화가 심하였다. 하수처리수를 이용한 소수력발전소의 경우, 단기적인 유량변화, 즉 하루 중 시간대별 유량변화를 고려하여 사용되는 수차발전기를 선정하여야 하며, 장기적인 유량변화, 즉 유량지속곡선을 통한 설계유량 산정이 필요하다. 하수처리수를 이용한 소수력발전은 일반하천에서의 소수력발전소의 가동율이 40% 전후로 결정되는 것에 비하여 연간 가동율 70% 중반으로 산정되어, 에너지회수율이 크기 때문에 하수처리장의 에너지자립화에 크게 기여할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 제시된 모델은 하수처리장 방류수를 이용한 소수력발전소의 설계시 소수력발전시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 사려된다.

#### 참 고 문 헌

1. Ministry of Environment, "Energy Self Supporting Plan of Waste Water Treatment Plant", 2010.
2. Korea Energy Management Corp., New and Renewable Energy Center, "New and Renewable Energy R&D Strategy 2030 Series: Small Hydropower", Bookshill, 2008.
3. C. H. Lee, W. S. Park, "Feasibility Study of Small Hydropower for Waste Water Treatment Plant", Korea Institute of Energy Research, Report, 2000.

4. Park, W. S., Lee, C. H., and Jeong, S. M., "An Analysis of Performance Characteristics for Small Hydro Power Plants", KWRA, Vol.2, No.1, 2001.
5. Park, W. S., Lee, C. H., "The Study of Performance Prediction Methods for Small Hydro Power Sites", KWRA, 2003.
6. Park, W. S., Lee, C. H., "Hydrologic Performance Characteristics Variation of Small Scale Hydro Power Plant with Variation of Inflow", KWRA, Vol.43, No.4, 2010.
7. Park, W. S., Lee, C. H., "Hydrologic Performance Characteristics of Small Hydro Power Resources for River Systems", KSES, Vol. 30, NO. 2, 2010.

#### 사 사

본 연구는 환경부 "글로벌탑 환경기술개발 사업"으로 지원받은 과제임  
(과제번호: GT- 11-B-01-010-0)