

하수처리장 적용을 위한 Semi-카플란 수차가 장착된 마이크로수력발전 시스템: 기흥레스피아 사례

Micro-Hydropower System with a Semi-Kaplan Turbine for Sewage Treatment Plant Application: Kiheung Respia Case Study

채규정[†] · 김동수 · 천경호 · 김원경* · 김정연* · 이철형** · 박완순**
Kyu-Jung Chae[†] · Dong-Soo Kim · Kyung-Ho Cheon · Won-Kyoung Kim*
Jung-yeon Kim* · Chul-Hyung Lee** · Wan-Soon Park**

코오롱글로벌 R&BD Center 환경기술연구소 · *한라건설 기술연구소

**한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부

Environmental Technology Lab, R&BD Center, Kolon Global Corp.

**R&D Center, Halla Construction and Engineering*

***Renewable Energy Research Department, Korea Institute of Energy Research*

(2013년 3월 14일 접수, 2013년 5월 13일 채택)

Abstract : Small scale hydropower is one of most attractive and cost-effective energy technologies for installation within sewage treatment plants. This study was conducted to evaluate the potential of a semi-kaplan micro-hydropower (MHP) system for application to sewage treatment plants with high flow fluctuations and a low head. The semi-kaplan MHP is equipped with an adjustable runner blade, and is without a guide vane, so as to reduce the incidence of mechanical problems. A MHP rating 13.4 kWp with a semi-kaplan turbine has been considered for Kiheung Respia sewage treatment plant, and this installation is estimated to generate 86.8 MWh of electricity annually, which is enough to supply electricity to over 25 households, and equivalent to an annual reduction of 49 ton CO₂. The semi-kaplan turbine showed a 90.2% energy conversion efficiency at the design flow rate of 0.35 m³/s and net head of 4.7 m, and was adaptable to a wide range of flow fluctuations. Through the MHP operation, approximately 2.1% of total electricity demand of Kiheung Respia sewage treatment plant will be achievable. Based on financial analysis, an exploiting MHP is considered economically acceptable with an internal rate of return of 6.1%, net present value of 15,539,000 Korean Won, benefit-cost ratio of 1.08, and payback year of 15.5, respectively, if initial investment cost is 200,000,000 Korean Won.

Key Words : *Small Hydropower, Micro-Hydropower, Energy Self-Sufficiency, Semi-Kaplan Turbine*

요약 : 소수력발전은 하수처리장 에너지 자립을 위한 효과적인 대안이다. 본 연구는 유량변동이 크고 유효낙차가 낮은 중소형 하수처리장(기흥레스피아) 적용을 위해 피치조절형 세미카플란(semi-kaplan) 마이크로수력발전의 적용 타당성을 평가하였다. 가변피치 semi-kaplan 수차는 유량조절을 위한 가이드베인은 생략하고 피치조절형 런너를 장착하여 기계적 결함은 줄이면서 유량변동이 큰 처리장에 특화된 기술이다. 마이크로수력발전 시스템은 설계조건(유량 0.35 m³/s, 유효낙차 4.7 m)에서 90.2%의 수차효율 달성이 가능하였고 발전용량은 13.4 kW로 산정되었다. 설비가동률 74%로 가동 시 연간 약 86.8 MWh 에너지 생산을 통해 2.1%의 에너지 자립이 가능하고 이는 연간 49톤의 CO₂ 감축효과와 맞먹는다. 경제성 평가결과 초기 건설공사비가 200,000,000원 이하인 경우에는 내부수익률은 6.1%, 순현가는 15,539,000원, 편익-비용률은 1.08, 투자회수년은 15.5년으로 경제성이 충분한 것으로 나타났다.

주제어 : 소수력발전, 마이크로수력발전, 하수처리장 에너지 자립, Semi-kaplan 수차

1. 서론

하수처리시설의 에너지 사용량은 연간 395,121 toe (ton of oil equivalent)로, 이 중 전력이 전체 소비의 98.6%를 차지한다(2007년 기준). 이는 연간 국내 총 에너지 소비량의 0.5%에 해당하는 엄청난 양이지만, 에너지 자립률은 0.8%에 불과하다.¹⁾ 환경부 ‘하수처리시설 에너지 자립화 기본계획(2010)’에 따르면 2030년까지 하수처리장 에너지 자립률 50%를 목표로 하고 있으며, 연간 907 GWh의 전력대체 및 558,000톤의 CO₂ 감축을 기대하고 있다. 따라서 목표한 에너지 자립률 달성을 위해서는 운영효율 개선을 통한 에너지

절감과 더불어 신재생에너지를 이용한 에너지 재생산 시설로서의 패러다임 전환이 절실하다. 그러나 다양한 신재생에너지 생산기술을 국내하수처리장에 적용하는 데는 많은 제약사항이 있다.

소수력 발전(small hydropower)은 공해가 없는 청정에너지로 다른 대체에너지에 비해 높은 에너지 밀도를 가지고 있고 유지비가 투자비의 3.63%로 경제적이다.²⁻⁵⁾ 특히 하수처리장에 소수력 발전을 적용하는 경우, 방류구와 같은 기존 구조물을 이용하기 때문에 토목공사가 거의 들지 않아 초기 투자비가 저렴하고(하천 소수력발전 설비의 60% 수준), 안정적 유량확보로 가동률 향상이 가능할 뿐만 아니라, 하

[†] Corresponding author E-mail: ckj@kolon.com Tel: 031-329-0626 Fax: 031-329-0601

Table 1. Current status of small and micro-hydropower installation in domestic sewage treatment plants (as of 2013)

Sewage treatment plants	Installed capacity (kW)	Turbine type	Head (m)	Start up
Asan	36	Kaplan	6.9	Dec, 2000
Cheonan	40	Kaplan	2.5	Jan, 2000
Jinhae	10	Kaplan	1.6	Oct, 2004
Daegu Shincheon	139	Kaplan	3.7	Jun, 2005
Daegu Seobu	74	Propeller	2.0	Oct, 2010
Chungju	135	Propeller	6.5	Nov, 2011
Kiheung Respia	14	Semi-kaplan	4.7	May, 2013

천에 설치하는 소수력 시스템과는 다르게 주변 생태계에 미치는 영향이 없는 장점이 있다.

환경부 에너지 자립화 기본계획에 의하면, 일반적으로 하수종말처리장 20,000톤/일 이상이면 소수력발전 설치가 가능한데, 방류수 낙차 2 m 이상, 발전설비 용량 10 kW 이상인 15개 하수처리시설에 소수력 발전이 적용된다면 연간 11 GWh의 전력을 생산할 수 있다.¹⁾ 또한 선협 연구에 의하면 국내 하수종말처리장 소수력발전 보급잠재량은 설비용량 기준으로 63개소 5,300 kW급(이용률 70~80% 가정 시)으로 보고되었다.³⁾

그러나 현재 국내에 설치 운영 중인 소수력 발전은 대부분이 강, 하천에 국한되며, 전국 438개(2010년, 처리용량 500 m³/d 이상 기준) 하수처리장중 현재 소수력 발전설비 도입은 7개소로 매우 미진한 상황이다(Table 1). 높은 소수력 부존 잠재량에도 불구하고 국내 하수처리장에 소수력 발전 적용 사례가 드문 이유는 국내 하수처리시설이 낙차가 낮고, 시간별 유량변동 폭이 커 효율이 낮기 때문이다. 동시에 타 신재생에너지 기술에 비해 정부의 초기 투자가 적극적이지 못하여 초기 시장형성 실패에 따른 규모의 경제 달성이 불가능 하였기 때문이다. 이와 같은 시장 형성의 실패는 민간 기업의 독자적 기술개발을 이끌어내지 못해 소수력 발전의 핵심장비인 수차(turbine)와 발전기의 기술혁신으로 이어지지 못했다. 즉 정부의 예산투입 저조로 초기 시장형성이 실패하여 경제성이 부족한 에너지원이라 여겨지고 있다. 현재 전체적인 소수력발전 기술은 선진국의 60%, 수차 등 주요 핵심기술은 55% 수준이며, 특히 주요 시스템기술, 수차 효율 기술은 외국에 비해 낮다.³⁾ 따라서 낙차가 적거나, 수량이 풍부하지 않아도 안정적 이용이 가능하며 경제적인 고효율 수차발전기의 개발이 요구된다. 하수처리장은 기존 하천과는 다른 유량패턴을 가지고 있는데, 현재까지 하수처리장 방류수를 이용한 소수력 발전에 대한 연구는 매우 부족한 상황이다. 하수처리장에 특화된 수차형식, 발전기, 수량제어 방식 및 설비표준화에 대한 연구를 통해 경쟁력 있는 신재생에너지원으로 개념 전환이 필요하다.

하수처리장은 하천에 비해 비교적 안정적인 유량확보가 가능하기 때문에 하천 소수력발전 시스템의 연간 가동률 40~50%에 비해서 상대적으로 높은 가동률 확보가 가능하다.²⁾

그러나 하수처리장의 유입수량이 당초 설계치에 비해 지속적으로 증가하고 있고, 계절적 편차 뿐만 아니라 일간에도 밤 시간에는 수량이 현저히 줄어드는 유황특성을 보이고 있다. 따라서 설계치보다 낮은 유량이 들어오는 기간에는 소수력 발전이 불가하고 가동률을 높이기 위해 설계유량을 낮은 값으로 잡으면 연간 발전량 면에서 불리한 문제가 생기게 된다. 대부분의 국내 하수처리장이 낙차가 2 m 미만이고 유량 변동이 큰 점을 고려했을 때, 저낙차 조건에서 유량변동이 큰 경우에도 안정적으로 가동이 가능한 소수력 발전에 대한 고려가 하수처리장 에너지 자립률 달성이라는 정부목표 달성을 위해 절실히 요구된다. 소수력 발전은 설비 용량 10,000 kW 미만의 수력발전을 의미하나 통상 국내에서는 3,000 kW 이하를 의미한다. 국내 중소형 하수처리장에 적용되는 규모는 100 kW급 미만이므로 본 연구에서는 마이크로수력발전(micro-hydropower)이라 구분하였다.

따라서, 본 논문에서는 연간 유량변동폭이 큰 중소규모 하수처리장인 기흥레스피아(설계용량 = 50,000 m³/d)의 방류구에 소수력 발전설비 적용을 위한 하수처리장 유황특성분석, 세미카플란수차가 적용된 저낙차 마이크로수력발전 시스템의 설계인자를 도출, 연간 전력생산량 및 에너지 자립률 예측을 통해 적용 타당성을 분석하였다. 이를 통해 국내 중소규모 하수처리장의 에너지 자립을 위한 소수력 발전시설 도입 가능성을 제시하고자 한다.

2. 평가방법

소수력발전 적용 타당성 평가를 위해 선정한 기흥레스피아 하수처리장(경기도 용인시 기흥구 하갈동)은 2005년부터 일평균 약 30,000 m³의 하수를 처리하고 있으며 연간 처리 유량의 변동이 큰 특징이 있다. 소수력발전의 설계 및 타당성 평가 절차는 Fig. 1에 나타내었다.

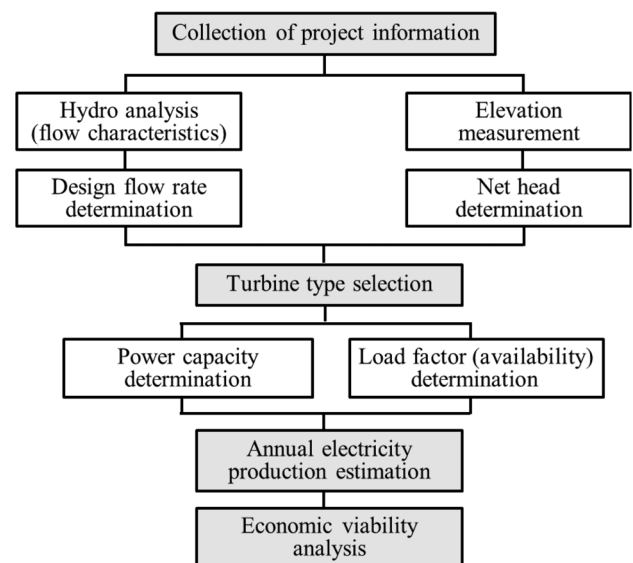


Fig. 1. Flow diagram for small hydropower plant design.

2.1. 기흥레스피아 수문특성 분석

하수처리시설은 연중 무휴로 운영되어 유량변동이 일반 하천에 비해 비교적 일정하다. 그러나 국내 하수처리장의 경우 계절적 유량변동폭이 크고, 하루에도 낮과 밤의 유량변동이 커서 최적의 소수력발전 설계를 위해서는 정확한 수문 특성 분석이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 2007년부터 2011년까지의 5년간 월별, 일별 및 시간별 방류수량 데이터를 이용하여 유량누적밀도 및 유량지속곡선을 분석하여 설계유량을 결정하였다.

2.2. 방류낙차 산정

소수력발전소의 설비용량은 유량과 유효낙차(net head, H_e)에 의해 결정된다. 유효낙차는 최대사용낙차(gross head, H_g)에서 취수구, 밸브, 수압관, 방수로 및 수로에서의 손실(head loss, H_l)을 제외한 값으로 표시된다(식 (1)). 일반적으로 수로에서의 손실을 제외한 제손실은 최대사용낙차의 5%로 가정한다. 기흥레스피아의 하수처리수는 최종방류구(Fig. 2)를 통해 신갈저수지로 방류되는데 정확한 낙차 산정을 위해 신갈저수지의 월별, 계절별 수위변화를 분석하여 정격유효낙차를 산정하고, 배관의 마찰손실수두 등을 고려하여 설계유효낙차를 결정하였다.

$$H_e = H_g - H_l \tag{1}$$

2.3. Micro-hydropower 설계 및 수차선정

소수력발전소에서의 단위시간당 생산되는 평균 발전량(P_e)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 그 외에 소수력발전소의 설비용량(C), 연평균가동률(L_f) 그리고 연간발전량(E_a)은 식 (3)~(5)와 같다.³⁾ 가동률은 1년 동안에 발전된 총발전량을 최대출력(설비용량)으로만 발전되었다고 가정할 때 발전한 시간과 1년(8,760 시간)에 대한 비율을 말한다.



Fig. 2. Effluent discharge outlet of Kiheung Respia treatment plant for the micro-hydropower installation.

$$P_e = \rho g H_e \eta \left(\int_0^{Q_r} Q P(Q) dQ + Q_r \int_{Q_r}^{\infty} P(Q) dQ \right) = P_1 + P_2 \tag{2}$$

$$C = \rho g H_e Q_r \eta \tag{3}$$

$$L_f = (P_1 + P_2) / C \tag{4}$$

$$E_a = 8,760 C L_f \tag{5}$$

여기서,

- P_e : 단위시간당 출력(kW)
- g : 중력가속도(m/s^2)
- ρ : 물 밀도(kg/m^3)
- η : 소수력발전소 시스템 효율(%)
- H_e : 유효낙차(m)
- Q : 유량(m^3/s)
- Q_r : 설계유량(m^3/s)
- P_i : 수력에너지(kW)
- P_1 : 부분출력(kW)
- P_2 : 정격출력(kW)
- L_f : 소수력발전소의 가동률(%)
- C : 시설용량(kW)
- E_a : 연간발전량(kWh)

소수력발전 시스템에서 수차(turbine)는 전체 투자비에서 차지하는 비중이 매우 크고 발전성과 직결되기 때문에 적정 수차의 선정이 매우 중요하다. 국내 하수처리장의 유황 특성을 반영하여 저낙차 조건 및 유량변동이 큰 조건에서도 운영가능하며, 특히 기 가동중인 처리장 적용을 위해서는 기존 처리장의 가동 중단없이 시공이 가능하고 토목구조물 공사를 최소화 할 수 있는 수차 선정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 비교적 저낙차에서 운영이 가능한 입축프로펠러형수차(propeller)⁶⁾, 가변피치 세미카플란(semi-kaplan) 수차, 프란시스(francis) 수차에 대해 적용가능 낙차조건, 유량변동 대응성, 설치용이성 등을 종합적으로 분석하여 선정하였다. 이후 도출된 설계유량, 유효낙차, 수차효율(η_t) 및 발전기효율(η_g)을 통해 수차발전기의 발전용량을 결정하였다. 이렇게 결정된 발전용량은 RETScreen 프로그램에서 나온 발전용량과 비교하여 선정결과의 타당성을 검토하였다.

2.4. Micro-hydropower 경제성 평가

기흥레스피아에 마이크로수력발전 경제성 분석을 위해 초기투자비, 연간운영비를 산정하였고 이를 이용하여, 편익-비용분석(benefit-cost analysis: B/C), 순현재가(net present value: NPV), 내부수익률(internal rate of return: IRR), 투자회수년(payback period: PBP)을 분석하였다.^{4,7)} 경제성 평가는 신재생에너지 경제성 분석도구 중에 하나인 RETScreen 프로그램의 Financial Analysis Tool을 사용하였다.⁸⁾ 일반적으로 하수처리장에 소수력발전소를 건설하기 위해 소요되는 총투자

비용은 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 운영 중 발생하는 비용이 연간비용에 속한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기흥레스피아 방류유량 변동 및 유량지속곡선

저낙차, 중소규모 하수처리시설인 기흥레스피아의 5년간 방류 유량을 분석한 결과 시간별 유량은 308~2,154 m³/hr, 일간 유량은 7,384~51,690 m³/d로 변동폭이 매우 큰 것으로 나타났다(Fig. 3(a), (b)). 일간 하수처리량은 가동 이후 지속적으로 증가하고 있으며 연도별 편차가 매우 컸다(5년 평균 23,170 ± 4212 m³/d). 이는 처리구역과 인구증가에 기인한 것으로 국내 타 처리장, 특히 유동인구가 많은 신도시 처리장에서 발생될 가능성이 높다. 연중 방류수량은 계절적 요인으로 인해 하절기에 많고 동절기에는 줄어드는 양상을 보였다. Fig. 3(a)은 하루 중 시간대별 유량변동 특징을 사계절로

나누어 나타내었는데, 야간에는 급격히 수량이 줄어들어 하루에도 약 3.0배 이상의 유량차이가 발생하였고 이는 수차 설계유량 산정 시 중요한 영향을 미친다. 즉, 설계유량보다 낮은 유량이 들어오는 기간에는 소수력발전이 불가하고 가동률을 높이기 위해 설계유량을 낮은 값으로 잡으면 연간 발전량 면에서 불리하게 된다. 따라서 유량변동이 비교적 큰 영역에서도 운영이 가능한 수차와 유량제어시스템 선정이 중소규모 하수처리장 적용을 위해서는 매우 중요하다. 동시에 최적 소수력발전 설계를 위해서는 유량의 단기변화(하루 중 시간대별 유량변화)와 장기변화(연간 유량변동특성)를 모두 고려해야 한다.⁹⁾

Fig. 4(a)는 기흥레스피아 처리장의 유량 데이터(Fig. 3)를 초당 유량으로 환산하고 크기별로 누적시킨 누적밀도 및 상대밀도분포를 보여주는데, 가장 많은 상대밀도분포 유량은 0.23 m³/s로 나타났다. 유량지속곡선(= 1 - 누적밀도함수)은 누적시간 증가에 따른 유량이 급격히 감소하는 하천의 유량지속곡선과는 다르게 비교적 안정적인 감소세를 나타내었다(Fig. 4(b)). 이는 하수처리장 적용을 위한 소수력발전 시스템은 기존의 일반적인 하천 소수력 발전설비와는 다르게 설계되어야 함을 의미한다.

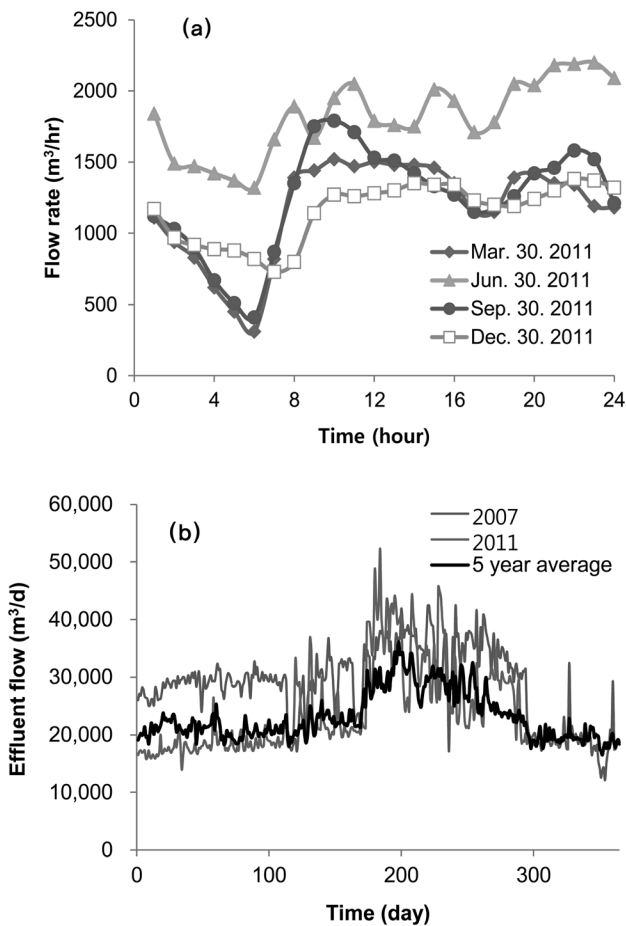


Fig. 3. Diurnal (a) and annual (b) flow variations of Kiheung Respia.

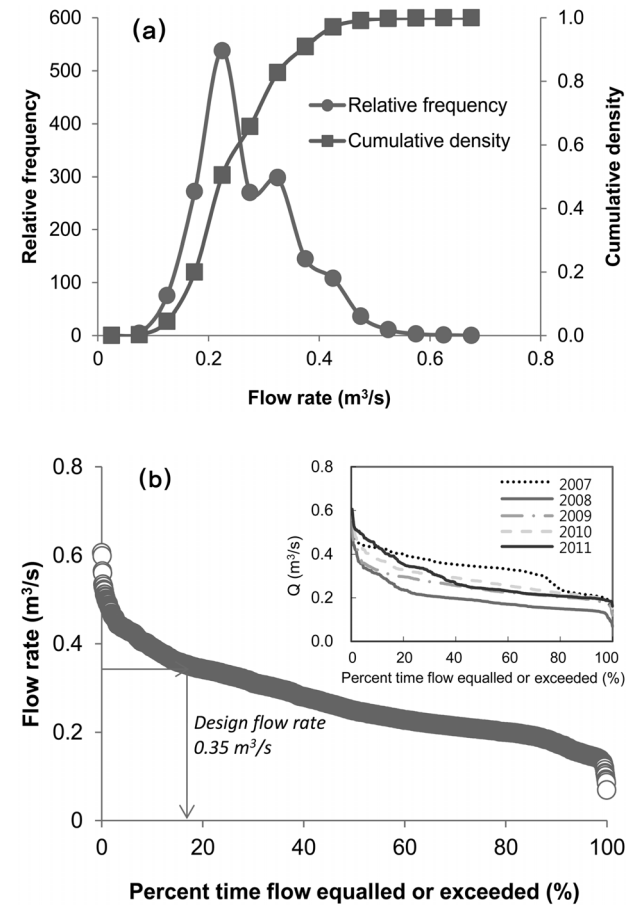


Fig. 4. Effluent flow characteristics of Kiheung Respia: relative frequency and cumulative density (a) and average flow duration (b). The inset shows individual flow duration curves for 5 years.

3.2. 설계유량 및 설계낙차 선정

3.2.1. 설계유량 및 설비가동률 선정

설계유량은 수차 발전용량과 수차 형식 결정을 위한 핵심 인자 중 하나이며, 변동폭이 큰 유량조건에서 전력생산량을 극대화할 수 있는 값의 선정이 필요하다. Fig. 4의 유량에 대한 상대빈도와 누적밀도 곡선을 통해 안정성과 지속성을 가진 설계유량 범위는 0.2~0.4 m³/s로 나타났고, 유량지속곡선을 통해 지속가능한 유량 0.35 m³/s를 설계유량으로 결정하였다. 또한 기흥레스피아 유량변동 범위 내에서 설계유량을 0.35 m³/s로 가정 시 설비가동률은 74%로, 일반 하천을 대상으로 한 소수력 설비 가동률 40~50%²⁾에 비해 높게 나타났다.

3.2.2. 유효낙차 선정

기흥레스피아 하수처리장의 소수력발전을 위한 취수용 보는 방류구 바닥레벨에 보상단을 맞추어 약 0.3 m 높이의 월류보를 설치하고, 측면에 수압관을 연결하여 취수하는 형태로 설계하였다. 수준측량을 통해 이들의 레벨을 측정하고 유효낙차를 산정한 결과, 최대사용낙차(H_g)는 4.8 m, 배관손실수두(H_f)는 0.1 m, 유효낙차(H_e)는 4.7 m로 각각 나타났다. 유효낙차 선정을 위해 방류수의 최종 유입지인 신갈저수지의 연간 수위계측 자료를 분석한 결과 2.2 m의 큰 변동폭을 갖는 것으로 나타나 연평균 수위를 설계방류 수위로 결정하였다. 시간에 따른 최종 방류수위의 변화는 실제 소수력발전 설비 가동 시 일간 뿐만 아니라 계절별로도 전력생산량의 변동을 유발한다.

3.3. Micro-hydropower system 수차선정 및 설계

수차는 소수력발전소 건설비의 25% 이상을 차지하는 가장 중요한 설비로, 적합한 수차의 결정이 매우 중요하다. 수차는 높은 낙차를 이용하는 충격수차와 낙차는 낮으나 풍부한 유량을 이용한 반동수차로 나눌 수 있다. 기흥레스피아에 설치될 소수력발전 시스템의 수차형식을 결정하기 위해서는 유효낙차, 설계유량, 수차출력 및 발전효율 등이 종합적으로 검토되어야 한다. 아울러 하수처리장의 유량변동폭이 큰 문제에 대응할 수 있고 기존에 설치된 구조물을 최대한 활용하여 토목공사비를 최소화 할 수 있는 방식이 고려되어야 한다. 최적 수차선정을 위해 세미카플란, 프로펠러, 프란시스타입 세 종류의 수차를 비교하였고 각각의 특성을 Table 2에 요약하였다.

Table 2. Characteristics of the various turbines considered for Kiheung Respia application

Parameter	Semi-kaplan	Propeller	Francis
Applicable head (m)	2~30	2~20	15~200
Available flow adjustment (%)	45~120	85~100	40~100
Flow range (m ³ /s)	0.1~25	0.1~20	0.1~10
Turbine efficiency (%)	85~90	85~90	85~90
Manufacturing cost	High	Medium	High
Installation cost	Low	Medium	Medium
Runner	Regulated	Fixed	Fixed

기흥레스피아 처리장은 방류유량이 적기 때문에, 유량변화에 대응하기 위해 하천이나 대형 하수처리장에서 이용하는 대수제어 방식보다는 하나의 수차발전기가 유량변화에 능동적으로 대응할 수 있는 피치조절형 카플란수차가 적합할 것으로 판단되었다. Table 2에 나타난 바와 같이 카플란 수차는 저낙차 소수력발전에 적용이 가능하고, 특히 유량과 낙차의 변화가 심한 곳에 효과적인데, 이는 런너 블레이드(runner blade) 전단부에 설치된 가이드베인(guide vane)으로 유입 유량을 조절하고 런너의 각도 조절을 통해 발전효율을 향상시킬 수 있기 때문이다. 기흥레스피아 처리장은 일간 방류유량이 적어 가이드베인과 런너블레이드를 모두 가변형을 채택한 일반 카플란 수차를 적용할 경우에는 기계적 문제가 발생할 가능성이 있다. 따라서 가변형런너를 적용하되, 소규모 유량에서는 효율면에서 크게 효과가 없고 기계적 문제를 유발할 수 있는 가이드베인을 생략한 세미카플란 수차가 가장 적합한 것으로 평가되었다. 특히, 방류구 주변의 지형이 일반적인 소수력발전소를 설치하기 어려운 여건이라, 토목공사비용을 줄이기 위해 사이펀 형상의 수압관을 지상에 노출시키는 댐-수로식 형태로 설계하였다. 최초 적용을 검토했던 입축프로펠러형 수차는 저낙차이면서 유량변화가 심한 수력발전 입지에 비교적 적합하고, 다른 종류의 수차보다 효율, 설치 및 운영 면에서 많은 장점을 가지는 것으로 보고되고 있으나⁶⁾ 기흥레스피아에 적용 시 설치를 위한 과도한 수직 토목구조물공사가 요구되어 부적합한 것으로 나타났다.

최종적으로 선정한 수차는 가변피치 세미카플란형으로 Tink사(슬로베니아)에 의뢰하여 제작하였다(Fig. 5). 수조실험결과 Fig. 6에 나타난 바와 같이 0.21 m³/s에서 0.45 m³/s까지의 넓은 유량구간에서 80.3~90.2%의 안정적인 수차효율을 달성할 수 있었으며 0.35 m³/s에서 최대효율 90.2%를 나타내었다(프로펠러형 수차 대비 6~9% 우수). 수차로 유입되는 유량이 증가함에 따라 수차효율 또한 증가하나 설계 유량인 0.35 m³/s 이상에서는 오히려 감소하는 것으로 나타

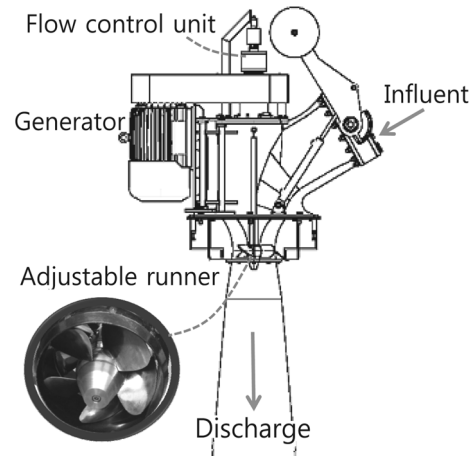


Fig. 5. Semi-kaplan micro-hydropower system with a flow control unit and adjustable runner.

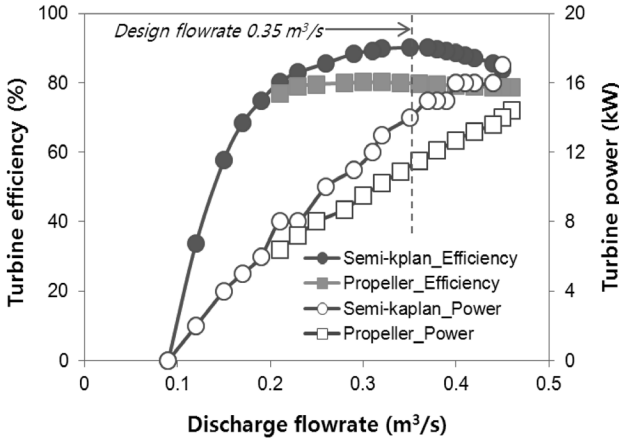


Fig. 6. Performance characteristics of semi-kaplan micro-hydro-power depending on flow rates.

Table 3. Summary of the design conditions and technical performance characteristics of the selected micro-hydro-power system with a semi-kaplan turbine

Parameters	Values
Design flow	0.35 m ³ /s
Net head	4.7 m
Electrical power output	13.4 kW
Turbine output	14.6 kW
Turbine efficiency at design flow (η_t)	90.23%
Generator efficiency (η_g)	92%
Overall efficiency ($\eta_t \times \eta_g$)	83.01%
Operational rate (load factor, L_f)	74%
Annual electricity production	86.8 MWh

났다(Fig. 6). 따라서 수차의 출력은 설계유량까지는 비교적 유량에 비례하여 증가하나 그 이후부터는 일부 활용하지 못하고 바이패스(bypass)되는 유량에 의해 유량에 비례하여 증가하지는 않는 특징을 가진다. 제작된 수차는 런너를 가변형으로 제작한 다음 주축 속에 작은 축을 넣고 상하로 움직여 런너의 각도가 조절되어 하수유량에 따라 가변속제어가 가능하였다. 가변피치 세미카플란 소수력발전 시스템은 설계유량 0.35 m³/s, 유효낙차 4.7 m 조건에서 수차효율(η_t)은 90.2%, 발전기효율(η_g)은 92.0% 달성이 가능하여 최종 소수력발전 시스템 효율은 83%로 발전용량은 13.4 kW가 가능한 것으로 나타났다(Table 3). 소수력발전 효율은 수차 형식 및 제조사에 따라 상이한데, 최근 시스템은 가용에너지의 90%까지도 전기로 전환할 수 있다는 보고가 있으나 통상 70~80% 수준이다.

3.4. 연간 예상발전량

세미카플란 마이크로수력발전(13.4 kW)을 적용하여 설계 조건(설계유량 0.35 m³/s, 유효낙차 4.7 m, 설비가동률 74%)으로 기흥레스피아에서 가동 시 연간 약 86.8 MWh 전기생산이 가능한 것으로 평가되었다. 이는 환경부 소수력 온실가스배출지수인 0.5649 CO₂톤/MWh¹⁾를 적용하면 연간 49톤

의 CO₂ 감축효과를 의미하며 기흥레스피아의 총 연간 사용 전력이 4,073 MWh (2009년 기준)인 점을 고려하면 약 2.1%의 에너지 자립률 달성을 의미한다. 태양광이나 풍력발전과 같은 타 신재생에너지 설비가 기상조건에 따라 가동시간이 제약되는 반면, 소수력발전은 중단없이 발전이 가능하기 때문에 하수처리장의 피크전력관리에도 효과적이다. 독일의 경우 일반 소수력 발전소별 평균 시설용량이 약 58 kW 급으로 규모가 작은 경우에도 적극 보급해 더 이상 개발할 여지가 없는 상황에도 불구하고 극히 소규모까지 적극 개발하기 위해 정부의 건설비 지원과 생산전력의 고가 매입 등 다양한 지원정책을 펴고 있다.³⁾ 그러나 우리나라의 경우 방류낙차 2 m 이상이 확보되는 20,000 m³/d 이상 하수처리장에 소수력발전을 적용 시 연간 11 GWh의 전력생산이 가능함에도 불구하고 전국 438개 공공하수처리장중 7개소만이 소수력발전이 적용되고 있는 사실은 의미하는 바가 크다.¹⁾ 정부의 에너지 자립화 정책실현의 수단으로 소수력발전의 기여도를 높이기 위해서는 국내 대다수 인 중소규모 하수처리시설에 특화된 수차와 소수력 발전시스템 개발이 필요하다.

3.5. 경제성 분석

소수력 발전소를 건설하기 위해 소요되는 투자비는 조사 및 설계비, 수차발전기, 부속설비비, 배전반 및 제어설비비, 방수로 토목설비비, 웨어수문설비비 등의 초기투자비와 유지관리비가 있다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 초기투자비의 대부분은 수차 제작비 및 토목공사비로 경제성 향상을 위해서는 저렴한 수차 제작과 아울러 토목공사가 최소화될 수 있는 시스템 선정이 필수적임을 의미한다. 경제성 평가를 위해 전력판매단가는 변동요금인 전력거래소 계통한계가격(SMP) 기준으로 최근 1년(2011.5~2012.4)의 평균값 136.58 원/kWh, 할인율은 농업부문 투자사업 타당성분석 종합보고서에서 제시한 5.5%를 적용하였다.¹³⁾ 기타 기준들은 Table 4와 같으며, 연료가격 상승률과 인플레이션은 고려하지 않았다. 경제성 분석결과, 기흥레스피아에 200,000,000원의 시설비를 투자함으로써 13.4 kW급 소수력 발전설비의 설치가

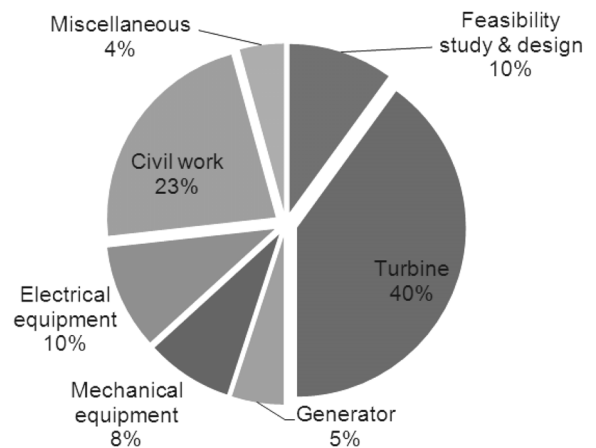


Fig. 7. Initial investment costs for the micro-hydropower installation with a semi-kaplan turbine.

Table 4. Financial analysis conditions for Kiheung Respia

Parameters	Values
Feasibility study and design	20,000,000 KRW*
Micro-hydropower equipment and installation	180,000,000 KRW*
Electricity selling price (SMP)	136.58 Won
Life span	30 years
Operational rate (load factor)	74%
Power capacity	13.4 kW
Annual electricity production	86.8 MWh
Discount rate	5.5%
Increasing rate of standard electricity price	3.0%
Maintenance cost	1% of total investment cost

* South Korean Won

Table 5. Summary of financial analysis of the micro-hydropower application for Kiheung Respia calculated by RETScreen program

Initial investment costs (KRW)	B/C	NPV (KRW)	IRR (%)	Payback (year)
240,000,000	0.90	-24,461	4.7	17.8
220,000,000	0.98	-4,461	5.3	16.7
200,000,000	1.08	15,539	6.1	15.5
180,000,000	1.20	35,539	6.9	14.3
160,000,000	1.35	55,539	7.9	13.0

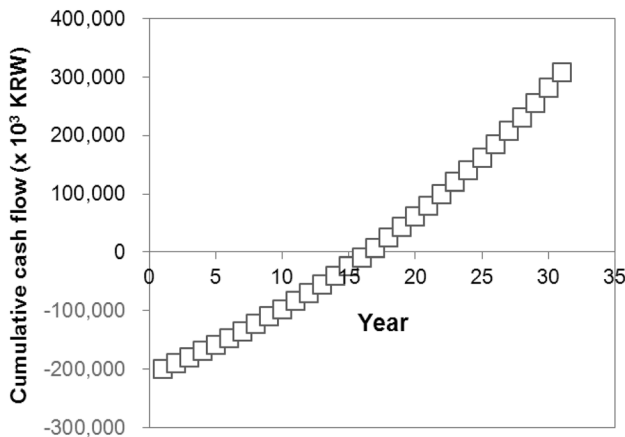


Fig. 8. Cumulative cash flow estimated by RETScreen program over the life span of the plant.

가능하고 이를 통해 86.8 MWh/년의 전력을 생산·판매함으로써 연간 11,642,000원의 수익을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 경제성 지표들을 살펴보면, IRR 6.1%, NPV 15,539,000 원, B/C ratio 1.08, 투자비 회수기간 15.5년으로 기흥레스피아에 소수력 발전설비를 설치·운영하였을 시 타당성이 있는 것으로 나타났다(Table 5).

초기투자비를 1.8억에서 2.4억까지 변경하였을 때 2억부터는 B/C 값이 1을 넘어서서 비용보다 편익이 높고 순현재가 또한 양의 값을 가져 경제성이 확보되었다.

하수처리장에 적용된 소수력발전에 특화된 통계자료는 충

분하지 않으나, 강, 하천, 댐식을 포함한 일반적인 소수력발전 투자비는 1,000 €/kW(그리스, 스페인, 불가리아, 체코, 에스토니아)에서 12,000 €/kW(독일)로 매우 다양하고, 단위 소수력발전 전력량 기준 생산단가 또한 0.4 €/kWh(불가리아) 에서부터 17.4 €/kWh(이탈리아)로 다양한 범위를 가진다.⁵⁾ 기흥레스피아의 경우 설비용량당 투자비는 14,949,000 원/kW로 비교적 높게 나타났는데 이는 적용 처리장이 소규모이고, 낙차가 낮으며 연구목적을 위해 비교적 고가의 장비와 계측기가 설치되었기 때문이다.

전국 공공하수처리장의 전력비는 2000년 773억에서 2009년 1,561억으로 매년 약 10% 이상의 증가율을 보이고 있다. 특히 중소형 하수처리장의 경우 유입하수량당 소모전력이 높기 때문에 소수력발전을 통해 처리장의 에너지 자립 도모가 적극 모색되어야 한다. 게다가 하수처리시설에 설치하는 소수력발전은 어류나 하천의 토사 이동을 막음으로써 자연생태계에 악영향을 미치는 하천이나 댐식 소수력발전과는 다르게 환경적인 면에서 더욱 바람직하고 높은 가동률 확보가 가능하다.^{10-12,14)}

4. 결론

하수처리장은 하천에 비해 비교적 일정한 유량을 확보할 수 있어 높은 설비가동률 달성이 가능하다. 그러나 국내 하수처리장의 대다수인 중소형 처리장(50,000 m³/d 이하 용량이 81.5%)은 일간, 계절간 유량변동이 심하고 방류유량이 적기 때문에 여러 대의 소수력발전 시설을 설치하여 대수 제어하는 방식은 비효율적이다. 기흥레스피아 처리장 적용을 위해 발전효율, 설비가동률, 유량변동 대응성, 토목공사비용을 종합적으로 고려한 결과 가변피치 세미카플란 타입이 유량변화의 대응범위가 가장 넓어 하수처리수의 단기변화에 신속하게 대응이 가능하고 기존 구조물을 최대한 활용할 수 있는 것으로 평가되었다. 기흥레스피아에 가변피치 세미카플란 수차를 적용한 경우 설비용량은 13.4 kW, 가동률은 74%, 연간 발전량은 86.8 MWh 달성이 가능하였다. 이를 통해 에너지 자립률 2.1% 달성이 가능하고 연간 49톤의 CO₂ 저감이 가능한 것으로 예측되었다. 경제성 평가결과 초기 건설공사가 200,000,000원 이하인 경우에는 경제성이 있는 것으로 나타났다. 초기투자비의 대부분을 차지하는 수차 제작비용이 낮아진다면 소수력발전의 경제성은 우수할 것으로 사료되고 정부가 추진하는 하수처리장 에너지 자립화 정책 실현을 위한 효과적인 대안이 될 것이다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌 환경기술개발사업”으로 지원 받은 과제임(과제번호 : GT-11-B-01-010-0).

참고문헌

1. Water Supply and Sewerage Policy Office, Strategic plan for the energy independence in the municipal wastewater treatment plant, Ministry of Environment (MOE) Republic of Korea(2010).
2. Park, W. S., "Case study of small hydropower developments using existing facilities," *J. Solar Energy Soc. Kor.*, **3**(4), 29~34(2004).
3. Na, D. H., Feasibility study on the construction of small hydro-power plants at the discharge point of Gumi sewage treatment plant, Ph. D. Dissertation, Kumoh National Institute of Technology(2010).
4. Santolin, A., Cavazzini, G., Pavesi, G., Ardizzon, G. and Rosssetti, A., "Techno-economical method for the capacity sizing of a small hydropower plant," *Energy Conver. Manage.*, **52**(7), 2533~2541(2011).
5. Alonso-Tristán, C., González-Peña, D., Díez-Mediavilla, M., Rodríguez-Amigo, M. and García-Calderón, T., "Small hydropower plants in Spain: A case study," *Renew. Sust. Energy Rev.*, **15**(6), 2729~2735(2011).
6. Lee, C. H. and Park, W. S., "Hydraulic performance of vertical axis propeller type hydro turbine for small hydropower plants," *Trans. Kor. Hydro. New Energy Soc.*, **14**(2), 171~176(2003)
7. Karlis, A. D. and Papadopoulos, D. P., "A systematic assessment of the technical feasibility and economic viability of small hydroelectric system installations," *Renew Energy*, **20**(2), 253~261(2000).
8. Natural Resources Canada, RETScreen manual book, <http://www.retscreen.net>(2004).
9. Park, W. S. and Lee, C. H., "Hydrologic performance characteristics variation of small scale hydro power plant with variation of inflow," *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **43**(4), 393~398(2010).
10. Dursun, B. and Gokcol, C., "The role of hydroelectric power and contribution of small hydropower plants for sustainable development in Turkey," *Renew Energy*, **36**(4), 1227~1235(2011).
11. Aslan, Y., Arslan, O. and Yasar, C., "A sensitivity analysis for the design of small-scale hydropower plant: Kayabogazi case study," *Renew Energy*, **33**(4), 791~801(2008).
12. Kosnik, L., "The potential for small scale hydropower development in the US," *Energy Policy*, **38**(10), 5512~5519(2008).
13. Korea Rural Community Corporation, Comprehensive report of investment project for feasibility analysis (2010) (in Korean).
14. Park, W. S. and Lee, C. H., "Analysis of performance characteristic for small scale hydro power plant with rainfall condition change," in Proceedings of Fall Conference, The Korean Society for New and Renewable Energy, Cheonbuk Provincial Office, pp. 614~618(2009).