

## 西歸浦市 東部下水處理場 放流水를 利用한 小水力發電

金 貴 植\* · 文 一 成\*\*

### Micro Hydropower Generation by Discharge Water of Dongbu Sewage Treatment Plant in Seogwipo City

Gui-Shik Kim\* · Il-Seong Moon\*\*

#### ABSTRACT

This study is to investigate the possibility of micro hydroelectric power plants by discharged water from DONGBU SEWAGE TREATMENT PLANT located in SEOGWIPO city, Jeju. The best location for installing the hydropower plant is at the location of EL(+)-2.0, the joint owned surface of the water on the west between discharge flow meter chamber and the surface of the sea water. In calculating the quantity of electric power generation, the flowrate used is 0.157m<sup>3</sup>/sec, the average 95day water flow for the recent 3years. The effective head is 12.41m between discharge flow meter chamber and the location of hydraulic turbine installation. Therefore, the quantity of electricpower generation is expected to be 14.6kW. The monthly quantity of electric generation is 9.46MWh and the yearly quantity of electric generation is calculated to be 113.53MWh. The type of hydraulic turbine to be applied to the hydro power generation is the hydraulic turbine of low head miniflow. Therefore, it is recommended to choose an inline-type hydraulic turbine generator. The recommended capacity is 50kW.

**Key words** : mini hydro power, hydro power generation, sewage treatment plant

#### 1. 서 론

소수력발전은 엄밀하게 정의하기는 어려우나 통상 학술적인 분류를 보면 설비용량과낙차 방식에 따라

분류하는데 설비용량을 기준으로 100kW미만의 소수력 발전은 micro hydropower, 100~1,000kW 규모의 小水力 발전은 mini hydropower, 1,000~10,000kW규모의 소수력발전은 small hydropower 등으로 구분한다[1]. 따라서 본 연구에서는 하수처리장에서 처리 후 버려지는 방류수가 가지고 있는 미사용 에너지를 대체에너지 생산시설인 소수력 발전설비로 회수하여 전력으로 생산 공급함으로써 처리장운영을 위한 에너지비용의 절감과 하수처리장내 자체 에너지 자급기반을 구축하여 환경친화적인 하수처리장 운영과 에너지 수급안정

\* 제주대학교 기계에너지 생산공학부

School of Mechanical & Energy system Eng., Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 산업대학원 기계에너지공학과

Department of Mechanical & Energy Eng., Graduate School of Industr., Cheju Nat'l Univ.

에 기여하고자 그 가능성을 연구·검토 하였다.

## II. 발전량 해석

### 2.1. 유입 하수량

계획 유입하수량의 변동에 따라 현재의 처리용량은 20,000m<sup>3</sup>/일 이지만, 2단계(2006년 10,000m<sup>3</sup>/일 증설)는 30,000m<sup>3</sup>/일, 3단계(2011년 5,000m<sup>3</sup>/일 증설)는 35,000m<sup>3</sup>/일로서 2016년에는 총35,000m<sup>3</sup>/일을 처리할 수 있도록 계획되어 있다[2].

### 2.2. 처리공정

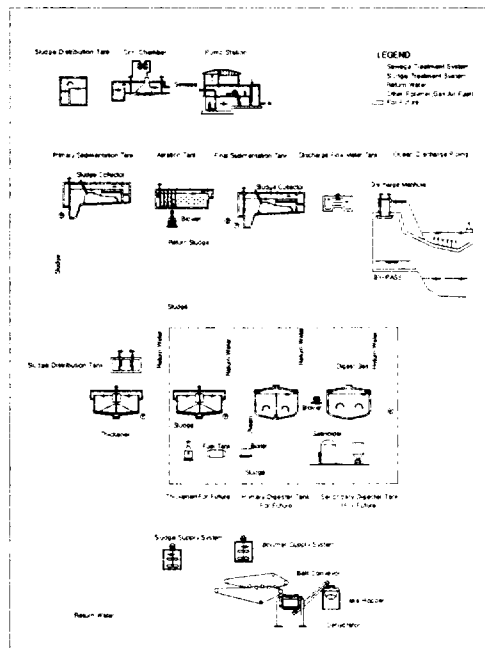


Fig 1. Schematic of sewage treatment process

동부하수처리장의 하수처리공정을 Fig. 1에 나타내었다. 차집관거(遮集管渠)를 통하여 자연유하로 중계 펌프장에 하수가 유입되고 모아진 하수는 중계펌프에 의해 압송(壓送)되어 하수처리장으로 유입된다. 유입된 하수는 침사지내 조목 및 세목스크린을 거쳐 자연유하로 유입분배조로 이송된다. 유입분배조에서는 하

수를 지별로 분배시키고 각 수처리 공정으로 분배된 하수는 물리적 및 생물학적 처리과정을 통해 적정 처리된 후 방류해역으로 방류된다.

### 2.3. 발전기실 위치선정

동부하수처리장내 소수력발전 시설을 설치하기에 가장 적합한 곳은 Fig. 2의 수리단면도와 Fig. 3의 발전기실의 위치도에 나타낸 바와 같이 방류유량계실과 해수면사이의 서측부지라고 판단되며, 그 이유는 이곳에 소수력 발전시설을 설치함으로써 기존 처리공정과 상충되는 문제를 최소화 할 수 있고, 현 시설물 운영담당 부서에서 소수의 인력보강으로 소수력 발전 시설을 병행 관리할 수 있으며 또한, 필요시에는 소수력발전으로 생산된 전력을 처리시설 내에 바로 공급할 수 있다는 장점이 있다.

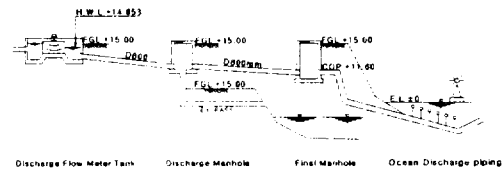


Fig. 2 Cross section of hydraulics

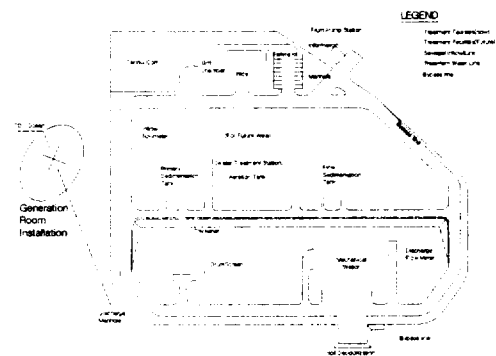


Fig. 3 Location of generation room

### 2.4. 발전량 검토

#### 2.4.1. 발전량 산출식

소수력발전은 그 형식에 따라 약간의 차이는 있으나 기본적인 원리는 높은 곳에 있는 물이 아래로 흘러 떨어지는 힘, 즉 물의 고저차(낙차)에 의한 위치에너지를 이용하여 수차에 회전력을 발생시키고 수차와 직결되어 있는 발전기에 의해서 전기에너지를 생산하는 발전방식이다. 즉 수차를 회전시키는 수량이 많을수록, 낙차가 클수록 발전 전력 생산량이 많아지며, 물이 위치에너지에서 전기에너지로 변환되는 발전능력의 산출식은 통상 다음과 같다[3].

$$P = 9.8 \times Q \times H \times \eta_t \times \eta_g \quad (1)$$

P : 발전용량 (kw)

Q : 사용수량 (m<sup>3</sup>/sec)

H : 유효낙차 (m)

$\eta_t$  : 수차효율 (%)

$\eta_g$  : 발전기 효율(%)

#### 2.4.2. 사용수량

일반적으로 수로식 발전소의 최대 사용수량은 보통 하천 갈수(枯水)량의 2~3배로 유허곡선에서 평수(平水)량(약50% 지속유량)을 적용하고 Dam식 발전소에서는 풍수(豐水)량(약 26% 지속유량)을 적용하는데 하수처리시설의 경우는 연간 유량변동이 적으므로 풍수량 이상을 계획 사용수량으로 적용하는 것이 적절할 것으로 생각된다[3]. 따라서 동부하수처리장에서 소수력발전의 계획사용수량을 결정하기 위하여 2002년에서 2004년까지 3년간의 일간 유입하수량을 Table 1, Table 2, Table 3에서 분석하여 나타내고 일간 시간대별 유입하수량을 Table 4, Fig. 4에 나타내었다[2].

Table 1. Flowrate of 2002(Unit:m<sup>3</sup>/sec)

Class (02)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Max	0.201	0.165	0.181	0.206	0.185	0.168	0.185	0.226	0.190	0.198	0.171	0.206
Min	0.104	0.091	0.106	0.107	0.111	0.106	0.109	0.075	0.101	0.100	0.109	0.107
Ave.	0.119	0.116	0.123	0.132	0.126	0.122	0.130	0.175	0.128	0.135	0.138	0.122

Table 2. Flowrate of 2003(unit:m<sup>3</sup>/sec)

Class (03)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Aug	Nov	Dec
Max	0.221	0.198	0.249	0.220	0.208	0.217	0.251	0.249	0.204	0.201	0.164	0.131
Min	0.111	0.108	0.108	0.110	0.114	0.132	0.183	0.140	0.149	0.126	0.111	0.105
Ave.	0.125	0.124	0.131	0.126	0.138	0.159	0.214	0.200	0.180	0.157	0.164	0.113

Table 3. Flowrate of 2004 (unit:m<sup>3</sup>/sec)

Class (04)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Aug	Nov	Dec
Max	0.130	0.168	0.185	0.214	0.254	0.227	0.218	0.238	0.228	0.181	0.170	0.183
Min	0.110	0.109	0.107	0.108	0.124	0.114	0.127	0.131	0.154	0.124	0.106	0.106
Ave.	0.117	0.119	0.119	0.126	0.167	0.138	0.143	0.160	0.173	0.146	0.120	0.121

Table 4. Flowrate by time(unit:m<sup>3</sup>/sec)

Class	Ave.	Feb 1	May 1	Aug 1	Nov 1
Ave.	0.160	0.125	0.224	0.149	0.144
Max	0.234	0.194	0.415	0.245	0.334
Min	0.056	0.033	0.095	0.054	0.032

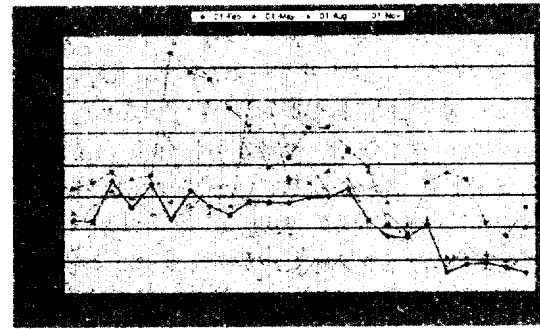


Fig. 4 Variation of flowrate by time

위 유량 데이터를 바탕으로 하수처리장의 유입하수량을 통계분석한 후 유허곡선을 작성하여 Fig. 5에 나타내었으며, 이 유허곡선에서 도출된 최대유량 Q1, 풍수량 Q95, 평수량 Q185, 저수량 Q275 및 갈수량 Q355 등의 유량 값들을 Table 5에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 하수처리시설의 계획 사용수량은 풍수량을 적용하게 되는데 Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 2002년에서 2004년까지 연도별 풍수량의 평균치는 약 0.157m<sup>3</sup>/sec인 것으로 나타났다. 따라서 소수력발전을 위한 사용수량은 0.157m<sup>3</sup>/sec로 결정한다.

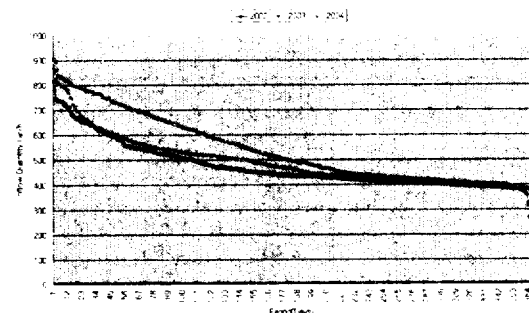


Fig. 5 Discharge-duration curve

Table 5. Flowrate analysis of year (unit:m<sup>3</sup>/sec)

Year	Capacity	Maximum Flowrate Q <sub>1</sub>	Q <sub>95</sub>	Q <sub>185</sub>	Q <sub>275</sub>	Q <sub>355</sub>
2002	0.231	0.226	0.143	0.122	0.113	0.106
2003	0.231	0.250	0.178	0.137	0.118	0.109
2004	0.231	0.254	0.150	0.129	0.116	0.108
Ave.	0.231	0.243	0.157	0.129	0.116	0.108

Q<sub>95</sub> : 95Day Water Flow  
 Q<sub>185</sub> : 185day(ordinary)water flow  
 Q<sub>275</sub> : 275day(low)water flow  
 Q<sub>355</sub> : 355day(drought)water flow

2.1.3. 유효낙차

동부하수처리장의 총낙차는 Fig. 2 수리 단면도에서 제시한 바와 같이 방류유량계실(E.L:+14.65)과 발전기실 예정위치(E.L:+2.0) 사이의 낙차로서 12.65m이다. 이중 유효낙차는 총낙차에서 손실수두를 제외한 낙차값을 말하며 아래의 손실수두의 산정에 의한 유효낙차의 계산결과를 Table 6에 나타냈다. 마찰손실수두는 방류유량계실 이후부터 발전기실까지 및 해양방류관저 끝단까지의 손실수두를 말하며, 각 계산식(Darcy Weisbach식)은 다음과 같다[4].

○ 마찰손실 수두

$$\Delta h_L(m) = f \times (L / D) \times (V^2 / 2g), \quad (2)$$

$$f = 0.03 + \{ (1 / (1,000 \times D)) \} \quad (3)$$

f = 마찰손실 계수,

L = 관길이 1,246m

(전단부150m + 후단부1096m)

D = 관직경 (0.8m),

V = 관내 평균유속(m/sec),

Q = 유량(m<sup>3</sup>/sec),

A = 관의 단면적(m<sup>2</sup>),

g = 중력 가속도(m/s<sup>2</sup>)

Table 6. Analysis of effective head

Classification	Maximum Flowrate by Time	Maximum Flowrate by Day	(Q <sub>95</sub> )
Flowrate[m <sup>3</sup> /s]	0.415	0.231	0.157
Section area[m <sup>2</sup> ]	0.5	0.5	0.5
Velocity[m/s]	0.83	0.462	0.314
Actual Head[m]	12.65	12.65	12.65
Head Loss[m]	1.70	0.53	0.24
Effective head[m]	10.95	12.12	12.41

2.1.4. 발전규모

하수처리시설에서의 소수력발전 시설용량 즉, 발전규모는 앞서 언급한 바와 같이 사용수량, 낙차 그리고 수차와 발전기의 효율 등을 적용하고 여기에다 발전시설의 가동률을 적용하여야 한다. 발전시설의 가동률은 일반 하천 및 소계곡의 경우 유량이 불규칙하기 때문에 약 40~50% 정도이나 하수처리시설의 경우에는 유입유량이 다소의 일간변동은 있으나 일반하천이나 소계곡에 비해서 1일 유입량이 거의 일정하기 때문에 가동률을 통상 90%이상으로 적용한다[3].

Table 7. Scale of power generation

Classification	Unit	Maximum Flowrate by Time	Maximum Flowrate by Day	(Q <sub>95</sub> )
Flowrate of Use	m <sup>3</sup> /sec	0.415	0.231	0.157
Effective head	m	10.95	12.08	12.41
Overall efficiency	%	76.5%	76.5%	76.5%
Output	kW	34.06	20.92	14.6
Used Equipment	%	90	90	90
Monthly Generation	MW	22.0	13.56	9.46
Yearly Generation	MW	264.9	162.7	113.53

2.1.5. 발전전력 사용계획

자가 발전된 전력의 사용방법은 크게 3가지 방법이 있으며 이는 기존전력 사용분의 일부를 절약하기 위하여 발전한 전기를 이용하는 소내부하 절약형, 발전한 전기를 전력회사에 판매하는 매전형, 산간 오지에서 상용전원과는 별개로 발전한 전기를 사용하는 자립전원형이 있으나 동부하수처리장의 경우는 소규모의 발전량인 반면 기존 전력시설이 갖추어져 있으므로 매전형이나 자립형 전원보다는 소내부하 절약형이 적합하다고 판단되며 생산된 전력은 하수처리장내 공동구내의 조명, 구내도로 및 어린이 놀이터 등에 현재 시설되어 있는 가로등의 야간조명, 방류수 수질감시를 위해 설치된 처리장입구 연못의 분수, Heatingcoil을 이용한 구내도로의 동결방지시설, 비상정전시 현재 시설되어 있는 20kW급 UPS(무정전전원공급설비)와 연동하여 UPS활용시간 연장 등에 사용할

수 있다고 판단된다.

### III. 발전설비 검토

#### 3.1. 수차의 형식

다양한 수차종류 가운데 동부하수처리장에 적용하기 위한 수차의 선정은 Fig. 6 에 나타낸 수차형식 선정도를 이용하도록 한다. 수차형식 선정도는 사용 유량과 적용하려는 유효낙차에 적합한 수차들을 그래프 내에서 쉽게 찾을 수 있도록 하였는데 동부하수처리장 소수력발전의 경우 사용유량이 0.157m<sup>3</sup>/sec이고, 유효낙차가 12.41m이므로 인라인형(Inline-Type)수차 또는 충동식의 크로스플로우(Cross Flow) 수차에 가깝게 해당되나 동부하수처리장의 경우에는 낙차 소 유량이기 때문에 발전기와 수차가 일체로 되어있어 구조가 간단하고 Compact한 인라인형(Inline-Type) 수차가 유리할 것으로 판단된다[5].

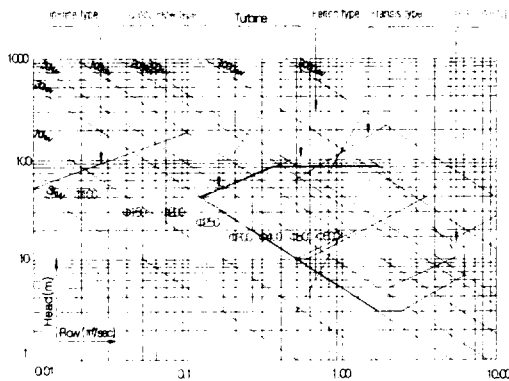


Fig. 6 Example of choosing hydraulic turbine

#### 3.2. 발전기 형식

동부하수처리장에서 적당한 발전기 형식은 구조적인 측면과 운전의 안정성 및 경제성 측면에서 유도발전기가 유리할 것으로 판단되며, 또한 유도발전기 중에서 회전자를 동기속도 이상으로 회전시켜 발전하는 농형이 회전자의 2차에 외부에서 교류전압을 인가하

여 2차 유기전압과 상쇄되는 점을 동기속도로 발전하는 권선형에 비해 구조적으로 견고하므로 농형유도발전기로 계획한다. 또한 발전전압은 국내에는 소수력 발전에 사용되는 수차발전기에 대한 표준화 작업이 이루어지지 않았으므로 소수력개발이 활발하며 표준화작업이 이루어지고 있는 가까운 일본의 자료 및 제조사의 규격을 통하여 수차발전기의 적정 단자전압을 결정하도록 하는데, 보통 발전용량이 250kW미만의 경우 적정전압은 220V로 계획되고 있었다. 그러나 동부하수처리장의 경우 국내에서는 일반적으로 산업용으로 많이 사용하는 380V로 계획하여 220V의 전원이 필요시는 전압을 낮춰 사용하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

#### 3.3. 용량 · 대수

수차와 발전기의 용량은 시간최대하수량0.415(m<sup>3</sup>/sec)과 최대낙차(풍수량의 유효낙차 12.41m)를 이용하여 식 (4), (5), (6)로서 계산한 결과 수차와 발전기는 50kW級 Inline-Type 농형유도발전기 1대를 설치하는 것이 좋을 것으로 판단되며 그 산출근거는 다음과 같다[1].

○ 이론수력  $P_1 = g \cdot H \cdot Q = 50.47(\text{kW})$  (4)

$g =$  중력가속도  $9.8(\text{m}/\text{sec}^2)$

$H =$  최대유효낙차  $12.41\text{m}$

$Q =$  최대사용수량  $0.415\text{m}^3/\text{sec}$

○ 수차수력  $P_2 = P_1 \cdot \eta_t = 42.9(\text{kW})$  (5)

$P_1 =$  이론수력(kW)

$\eta_t =$  수차효율  $85\%$

○ 발전출력  $P_3 = P_2 \cdot \eta_g = 38.61(\text{kW})$  (6)

$P_2 =$  수차수력(kW)

$\eta_g =$  발전기 효율  $90\%$

#### 3.4. 토목 · 건축시설

본 연구에서는 소수력 발전설비이므로 발전관로 시 작부를 방류유량계실로 하고 별도의 관거매설공사 없이 기존의 방류관거를 따라 Fig. 7에 나타낸 바와 같

이 적정지점에 발전기실을 설치하도록 하며 발전기실은 발전시설인 수차와 발전기가 지진, 해일, 태풍 등에 의하여 침수되거나 월과 등에 의한 침수 등 외부의 불리한 환경으로부터 보호되어야 하고 토지 사용 계획 등에 의거 그 사용 계획에 부합 되어야한다. 따라서 평균해수면보다 약2m높은 지상 E.L.(+)2.0에 설치한다. 이는 조수간만의 차에 의한 수위변동을 고려하고 또한 발전설비가 들어설 구조물내의 배수를 위해서이기도 한다. 발전소는 다른 기존시설물의 활용 및 기능에 영향이 없도록 하고 철근콘크리트 구조물로 계획하여 외관은 수려한 제주의 해안절경에 어울리도록 원형지붕에 자연석 돌 붙임으로 마감한다.

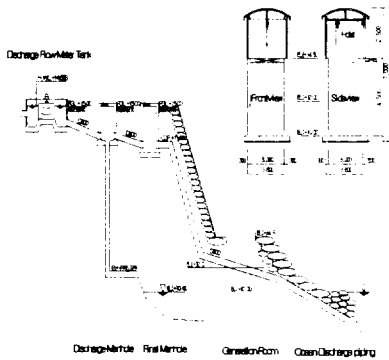


Fig. 7 Lay out of generation room

### 3.5. 기계설비

기계시설의 계획에서는 수차의 유지보수를 위한 입·출구밸브 시설과 신축관, 강관류 설치와 구조물내 배수를 위한 배수펌프 설비 그리고 발전소와 수차의 해체, 설치 및 수리의 유지보수에 필요한 인양설비 등으로 계획하여야 할 것이다. 그러나 동부하수처리장의 경우 밸브 설비 계획에서는 입구밸브의 경우 기존 방류맨홀의 수문을 이용하여 차단하고 출구밸브는 Butterfly밸브 등을 고려한다. 또한 비상시 및 발전기 해체조립시 Drain을 고려하여 배수펌프를 설치하는데, 펌프의 형식은 수중모터펌프를 이용하고 조작성은 자체수위계의 수위감지에 의한 자동운전이 되도록 한다. 또한 인양설비는 수차 또는 발전기 등의 조립과 분해, 설치, 철거를 위하여 발전기실 상부에 유

지관리용 Monorail Hoist를 설치하고 설치되는 인양설비의 용량은 발전설비 제작자의 제시사양에 따라 대략 1~2톤의 규모로 계획하도록 하고, 점검 및 유지 보수시 작업자의 안전과 인양설비 본래기능을 고려하여야 하고 소형 인양설비이므로 운전실은 별도로 계획하지 않는다. 인양높이는 발전실 바닥에서부터 Hoist hook의 최대권상 위치까지의 높이 등을 고려하여 약7m로 계획한다.

## IV. 결 론

이상으로 서귀포시 동부하수처리장의 방류수를 이용한 소수력발전에 대하여 검토한 결과는 다음과 같다. 소수력발전시설을 설치하기에 적합한 곳은 발전량과 운영관리 측면에서 방류유량계설 이후와 해수면 사이 EL(+2.0 지점인 서측 부지가 적합하며, 발전량 산정에 있어서 사용수량을 최근 3년간의 풍수량의 평균인 0.157m<sup>3</sup>/sec로 하고, 방류유량계설과 수차설치위치 사이의 유효낙차가 12.41m이므로 발전시 예상 정격출력은 14.6kW로 산정되며, 월간발전량과 연간발전량은 9.46MWh, 113.53MWh로 산정되었다. 또한 소수력발전에 적용될 수차의 형식은 저 낙차 소수량의 소수력발전이므로 수차와 발전기가 일체로 된 In-line-Type 수차발전기를 선정하며, 용량은 50kW급 1대를 설치하면 적합할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] 제주도 "제주하수처리장 대체에너지사업타당성조사" 2004, P77. P113~114
- [2] 서귀포시(<http://www.seogwipo.go.kr>) "동부하수처리장 운영자료 "2002~2004년.
- [3] 대구경북개발원 "신천하수종말처리시설 소수력발전적용검토" 2002, P37~38.P40
- [4] 환경부 "하수종말처리시설 기계설비공사 설계지침" 2001, P29.
- [5] 久保田펌프社(株)(<http://www.kubotapump.co.jp>).