

# 양어장 방류수를 이용한 해양소수력발전소 구축에 관한 연구

황영철\* · 최영도\*\*†

## Construction of Marine Small Hydro Power Plant using Discharge Water of Fish Farm

Yeong-Cheol Hwang\*, Young-Do Choi\*\*†

*Key Words* : Marine small hydro power plant(해양소수력발전소), Fish farm(양어장), Discharge water(방류수), Tubular hydro turbine(튜블러수차), Field test(현장시험)

### ABSTRACT

This study is aimed to construct a marine small hydro power plant using discharge water of fish farm in Jeju Haengwon-ri. The difference of design methods between marine small hydro power plant and land small hydro power plant is to consider the tides. Moreover, ground condition should be examined because gushout sea water comes out from the ground at high tide in Jeju as the ground of Jeju beach consists of basalt stone. From the field test of the turbine generator after construction of the power plant, output power and efficiency of the turbine generator shows good conformance to the required conditions.

### 1. 서 론

소수력발전소를 도입하기 위해서는 대수력발전소와 달리 전체 발전소 건설비용 중 토목공사 비용을 가능한 줄이고, 현재 사용 중인 시설과 공간을 최대한 활용하여 건설비용을 줄이는 것이 현실적이다.<sup>(1~5)</sup>

특히, 최근에는 해안가의 육상 양어장에서 사용 후 바다로 흘려보내는 해수 방류수를 이용한 해양소수력발전소에 대해서도 관심이 높아지고 있으며, 우리나라에서는 제주도를 비롯하여 남해안 연안에 해양소수력발전소를 설치할 수 있는 소수력 자원 부존량이 상당히 많이 존재하는 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup>

그러나, 항상 일정한 유량과 낙차를 확보할 수 있는 장점이 있는 반면에 해안가에 위치한 양어장의 위치적인 특성상 낙차가 기존의 소수력발전소에 비해서 상대적으로 작고, 해수를 펌프로 육지까지 양수해야 하는 양어장의 특성상 비교적 적은 유량을 사용할 수 있기 때문에 수차발전기의 설계범위가 매우 제한적인 특성을 가진다.

본 연구에서는 이러한 해수 방류수를 사용하는 육상 양어장의 특성을 고려한 해양소수력발전소의 건설에 관련된 사

항들에 대해서 최적 설계 및 효율적인 시공방법 등에 대해서 검토하였다.

### 2. 해양소수력발전소 입지조건

#### 2.1. 양어장과 친수공간

Fig. 1은 제주 행원리에 설치된 해양소수력발전소와 양어장에 대한 조감도를 보이고 있다. 발전소가 위치한 장소는 육상의 양어장에서 흘려보내는 방류수가 모이는 저수지의 바다쪽 최종 방류구측에 위치해 있다. 따라서, 발전소 상류측에서 수차로 유입되는 유량과 낙차는 항상 일정하지만, 발전소 하류측 방류구에서는 조수간만의 영향으로 수위가 변동하게 되어 수차에 영향을 미치는 유효낙차는 항상 변동하게 된다.

한편, 이곳 발전소에서 생산된 전력은 양어장의 해수 양수펌프 동력 및 양어장 유지 전력으로 사용되어 양어장 운영상 경제적으로 큰 도움이 되고 있고, 주변에 설치된 풍력발전소 및 태양광발전소와 연계할 경우 스마트그리드로 운용하기에 적합하다.<sup>(7)</sup>

Fig. 2는 육상 양어장 내부 전경을 보이고 있다. 일반적으로 양어장에서는 펌프를 이용하여 해수를 해안가에서부터

\* (주)신한정공 (Research Institute, Shinhan Precision Co., Ltd.)

\*\* 목포대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : ydchoi@mokpo.ac.kr

양수하여 양어장 전체에 해수를 공급할 수 있는 대형 저수조에 해수를 저장하게 되고, 이 저수조에서 양어장의 각 수조에 일정한 양의 해수를 연속적으로 공급하게 된다.



Fig. 1 Aerial view of marine small hydro power plant and fish farm in Jeju Haengwon-ri



Fig. 2 Water tank of fish farm using sea water



Fig. 3 Discharge reservoir of fish farm before constructing marine small hydro power plant

따라서, 해양소수력발전소를 건설하기 위한 수차의 용량과 낙차를 결정하기 위해서는 양어장에서 사용 중인 펌프의 양수 용량을 파악하고, 양어장에서 방류되는 해수의 최종 방류구가 위치한 높이와 해수면의 높이를 고려하게 되면 수차의 유량과 낙차를 예측할 수 있다. 발전소가 건설된 제주 행원리에 위치한 양어장에서는 총 26대의 펌프를 가동 중이며, 하루 양수량이 700,000m<sup>3</sup>/일이다. 또한, 방류수의 최종 방류구와 해수면 사이의 낙차는 조수간만의 차를 고려할 경우 평균 1.7m이다.

특히, 양어장 방류수는 수차의 작동유체로서 사용될 경우 수차 내부유로에서 폐색을 일으킬 만한 오염물질이 거의 포함되어 있지 않기 때문에 발전소 유지관리가 매우 용이해지는 장점을 가지고 있다.

Fig. 3은 양어장 최종 방류구가 위치한 해안가의 해양소수력발전소가 건설되기 이전의 모습을 보이고 있다. 제주가 관광지인 지역적인 특성으로 인하여 환경친화적인 친수공간으로 개발되었으며, 발전소 건설 시에도 친수공간으로서의 개념이 고려되었다.

## 2.2. 조수간만의 차

해안가와 접하는 위치에 소수력발전소를 건설할 경우 조수간만의 차에 따른 해수면 수위의 변화를 고려해서 수차의 유효낙차를 정할 필요가 있다.

따라서, 해양소수력발전소가 건설될 제주 행원리 해안의 조석분석 자료를 이용하여 Fig. 4의 조위면도를 작성하였으며, 4년간(2004년~2007년) 성산포 조위관측소에서 수집한 실제 관측조위<sup>®</sup>를 적용하였다. 관측자료를 살펴보면 평균해면에 대하여 평균조차는 1.308m를 보이고 있다. 또한 하루 2번씩 일어나는 간조와 만조 및 약 15일 단위로 일어나는 최대조차를 포함하고 있다.

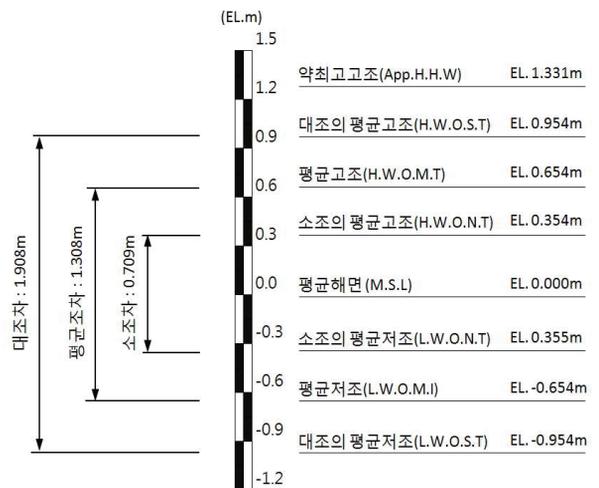


Fig. 4 Typical sea water tidal levels at Jeju Haengwon-ri by KHOA (2004~2007)

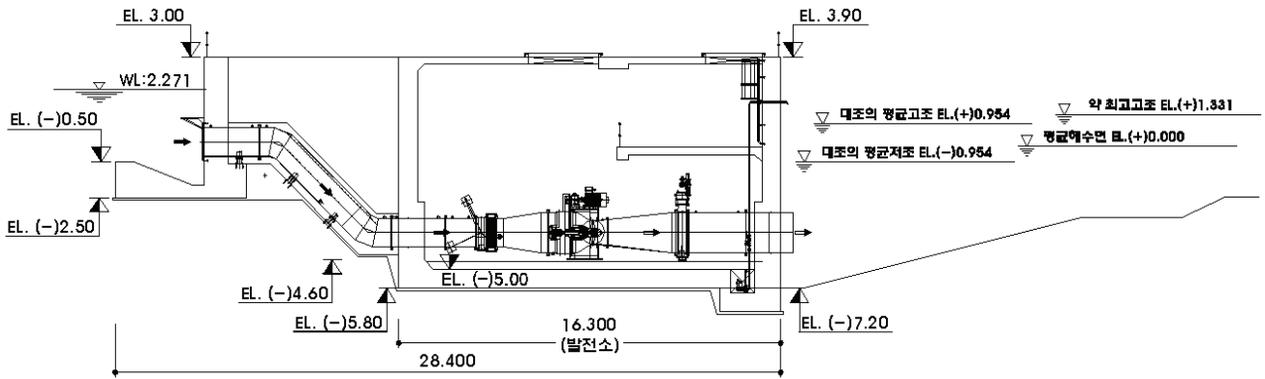


Fig. 5 Marine small hydro power plant and sea water level

### 3. 해양소수력발전소의 설계 및 건설

#### 3.1. 해양소수력발전소의 설계

해양소수력발전소는 해안가에 위치하기 때문에 조수간만에 따른 해수면 수위가 수차의 유효낙차에 미치는 영향을 고려해서 설계를 수행해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 전 절에서 검토한 조수간만의 차에 의한 해수면 수위를 고려하여 해양소수력발전소를 Fig. 5와 같이 설계하였다.

Fig. 5는 수차가 설치될 발전소의 벽체, 수차, 유입 및 유출관을 나타내고 있으며, 발전소 상부 저수지 및 하부 방수구축 해저 단면을 보이고 있다. 그리고, 상부 저수지 및 하부 방류구축에는 조수간만에 따른 평균 해수면 기준 수위 고저차를 나타내고 있다.

상부 저수지의 수위는 양어장 방류수의 유량이 항상 일정하기 때문에 평균해수면에 대하여 항상 2.271m를 유지하고 있다. 발전소 하부 방류구축 해수면은 조수간만의 차에 의해 대조의 평균고조가 0.954m이고 대조의 평균저조가 -0.954m이며, 약 최고고조는 1.331m에 달한다.

따라서, 수차의 유효낙차는 평균 해수면 기준 연중 조석표와 관로손실을 검토한 결과 간조 시에 최고 2.254m, 만조 시에 최저 0.346m로 결정하였다.

한편, Fig. 6은 제주 행원리에 건설될 해양소수력발전소의 평면도와 정면도를 보이고 있다. 발전소 내부에는 2대의 튜블러수차가 설치되고, 튜블러수차의 상류 유입관과 하류 방류관에 버터플라이밸브가 각각 1대씩 설치되어 있다. 수차 상류측 밸브는 유입유량 조절 및 비상시 긴급차단용으로 사용되고, 하류측 밸브는 수차 정기점검 및 긴급 보수공사 시에 방류구축 해수의 역류방지용 차단밸브로 사용된다.

발전소 벽체, 하부 바닥면, 상부 천정은 모두 철근콘크리트 구조로 설계하여 강도를 확보하고, 해수에 대한 내부식성을 가지도록 하였다.

#### 3.2. 튜블러수차의 설계

해양소수력발전소에 설치할 수차의 경우 해수면 수위의 변동을 고려하여 주어진 유량과 낙차에서 최고효율을 달성할 수 있어야 하며, 해수에 대한 내부식성을 고려한 재료로 제작되어야 한다.

Fig. 7은 본 연구에서 설계한 튜블러수차를 보이고 있으며, Table 1은 수차의 사양을 나타내고 있다. 작동유체로서는 양어장 해수 방류수를 사용하며, 수차의 정격 유량은 양어장 방류수량을 기준으로 하여  $Q=2.75\text{m}^3/\text{s}$ 로 정하였으며, 유효낙차는 평균해수면 수위와 조수간만의 차를 고려하여 최고 유효낙차를  $H_b=2.254\text{m}$ , 최저유효낙차를  $H_f=0.346\text{m}$ 로 정하였으며, 평균 유효낙차를  $H_{ave}=2.0\text{m}$ 로 하였다. 수차의 회전수는  $200\text{min}^{-1}$ 로 정하였고, 발전기의 회전수는  $610\text{min}^{-1}$

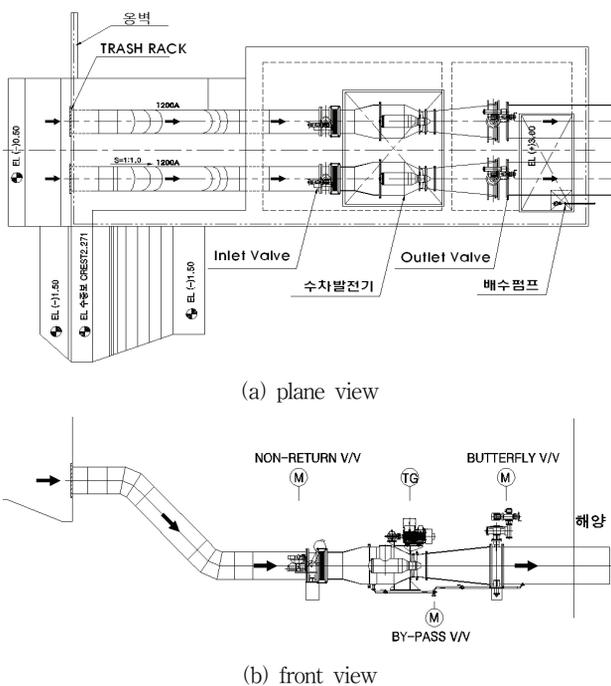


Fig. 6 Schematic view of marine small hydro power plant in Jeju Haengwon-ri

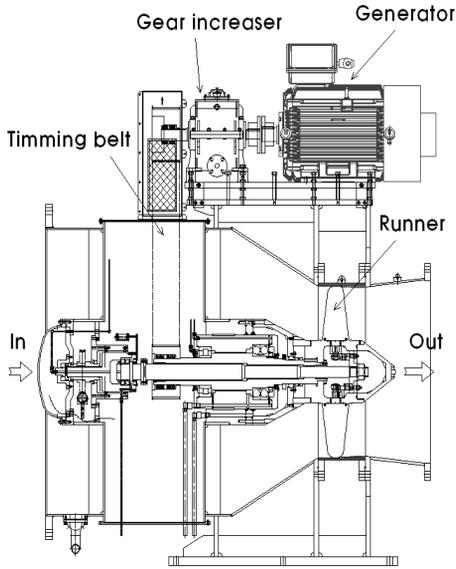


Fig. 7 Test tubular turbine of marine small hydro power plant

로 정하였다. 수차 주축과 발전기 주축 사이의 동력전달은 고정력 HTD 타이밍벨트를 사용하였다.

주어진 유량과 낙차를 고려하여 수차의 종류를 선정하였으며, 튜블러수차를 적용하는 것이 최적화된 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단되어 2대의 수차를 병렬로 설치하여 1대 당 정격출력을 30kW로 예상하여 총 60kW의 출력이 발생하는 것으로 설계하였다.

튜블러수차 러너의 고유 형상에 따른 열림 개도별 통과유량 데이터를 적용한 수차 설계 프로세스를 정리하면 다음과 같다.

단,  $P$  : 출력[kW],  $H$  : 유효낙차[m],  $Q$  : 수차유량[m<sup>3</sup>/s],  $n$  : 회전수[rpm],  $D_1$  : 러너 외경[mm],  $D_4$  : 러너 스포트 직경[mm],  $H_s$  : 흡출높이[m]

1. 설계유량은 측정유량에서 5% 증가한 유량으로 선정하여  $Q_{des} = 2.89 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 결정함.
2.  $H < 10\text{m}$  이므로 러너는 4매로 선정하고, 단위회전수  $n_{11} = 145 \text{ rpm}$  으로 선정함.
3. 러너의 개도를 22°로 선정하고 이때 통과하는 단위유량  $Q_{11} = 2,050 \text{ l/sec}$ 로 선정함.

$$D_4 = \sqrt{\frac{3025}{2050 \times \sqrt{2}}} = 1.021\text{m}$$

$$D_1 = \frac{D_4}{0.982} = 1.04\text{m}$$

러너 선정 외경  $D_{1P} = 1.00\text{m}$ 로 결정함.

러너 선정 스포트 직경  $D_{4P} = D_{1P} \times 0.852 = 0.982\text{m}$

4. 수차 러너의 회전수 결정을 위하여

$$n = n_{11} \times \frac{\sqrt{H}}{D_{4P}} = 145 \times \frac{\sqrt{2}}{0.982} \approx 209 \text{ rpm}$$

러너 선정 회전수  $n_P = 200 \text{ rpm}$ 으로 결정함.

5. 캐비테이션 특성 검토

발전소의 하부 방수구측 수위는 항상 수차의 중심보다 상부에 위치하므로 캐비테이션이 발생하지 않음.

#### 6. 무구속 속도의 결정

일반적으로 고정형 날개의 경우 발전기의 부하차단 시 수차의 회전수 상승률은 180~200%에 도달하는 것으로 알려져 있으나, 가변형 날개의 경우 230%로 상승하는 것을 고려하였음.

#### 7. 수차 상세설계

- 베어링 선정
- 구동부 쉘 선정
- 구동벨트 선정
- 러너구동용 서보모터 선정
- 회전수와 출력에 따른 최적의 발전기 선정
- 기타 기계부 선정

### 3.3. 발전소 건설

Table 1: Specifications of test hydro turbine

Type		Horizontal axis tubular
Rated output power	[kW]	35
Effective head	[m]	2.0
Flow rate	[m <sup>3</sup> /s]	2.75
Rotational speed	[min <sup>-1</sup> ]	200
Turbine center location	[EL.m]	EL. -3.474

제주 행원리 지역에 설치할 해양소수력발전소의 입지조건을 분석 및 검토하여 최적 운전조건에서의 수차발전기를 설계하였으며, 발전소 건설을 위한 과정에 대해서 Fig. 8과 같이 정리하였다.

먼저, 발전소 설치지역에서의 기초공사를 위한 터파기 작업을 Fig. 8(a)와 같이 수행하였으나, 물막이 공사를 하였음에도 불구하고 지하 터파기공사를 한 구역에서 물이 고이는 문제가 발생하였다. 이것은 제주도 지역의 토양 및 암반이 현무암으로 구성되어 있기 때문에 조수간만의 영향으로 만조 시에는 현무암 자갈층 사이로 용출수가 발생하는 것이다.

또한, Fig. 8(b)와 같이 간조 시에 기초바닥 부분에 철근 콘크리트를 투입하려고 하였으나, 바닥면에서 용출수가 계속 나와 직접 콘크리트 투입으로 인한 양생은 불가능하였다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 Fig. 8(c)와 같이 발전소 전체 바닥면에 대해서 육상에서 제작하여 완전 양생 후, 하부에는 해수의 침투를 막기 위해 방수를 실시하여, 수밀대책을 한 후에 발전소 바닥면 전체를 설치하였다.

Fig. 8(d)는 발전소 바닥면을 설치한 후를 보이고 있으며, 만조 시에는 기초콘크리트 작업 부분이 해수에 잠기지만, 육



(a) Excavation



(e) Wall curing and installation of inlet tube



(b) Arrangement of concrete foundation



(f) Installation of turbine base concrete



(c) Installation of concrete base



(g) Installation of turbine & running test



(d) View of installed concrete base



(h) Completion of hydro power plant

Fig. 8 Construction process of marine small hydro power plant at Jeju Haengwon-ri

상에서 콘크리트를 완전 양생하여 설치하였기 때문에 내구성에는 문제가 없다.

Fig. 8(e)와 (f)는 발전소 벽체공사, 유입관로 작업, 발전소 내부 수차 설치기초 공사를 하는 모습을 보이고 있으며, Fig. 8(g)는 발전소 건설이 완료되고, 수차의 설치 및 시운전 상황을 나타낸다.

마지막 단계로 수차발전기의 현장시험에서 보증출력 및 보증효율을 확보하였음을 확인하고, 준공을 마친 상태의 발전소 전경을 Fig. 8(h)에서 보이고 있다.

이상의 발전소 건설 과정은 발전소 설치 지역의 현장 공사 여건 및 상황에 따라서 일정을 조정하였다.

### 3.4. 수차발전기 성능특성

수차발전기의 성능특성은 소형의 경우 공장에서 성능시험을 실시하지만, 대형의 경우에는 모형실험을 통하여 성능환산에 의한 수차발전기 성능을 확인하게 되며, 발전소에 납품된 수차발전기의 시운전을 통한 현장시험을 거치게 된다.

성능시험에서의 효율은 수차 본체의 출력으로부터 계산되는 수차효율과 발전기의 출력으로부터 계산된 발전기효율로 나눌 수 있다. 일반적으로 보증효율은 발전기출력을 기준으로 하게 되나, 출력에 직접적인 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 수차의 효율이다. 발전기의 효율은 제작완료 시 공장 검수를 통하여 최소, 정격, 최대 부하에서의 효율을 측정하여 그 값을 기준으로 수차발전기의 전체효율에 적용하게 된다.

본 연구에 적용된 수차성능 시험방법은 수력발전소 발주자, 설치자, 수차 제조사간의 협의에 의해 JEC-4002<sup>(9)</sup>의 기준을 적용하였으며, 초음파 유량계법에 의해서 수차효율을 계산하였다.

현장시험에서 최소, 정격, 최대 출력시험을 수행하였으며, 정격 및 최대출력시험은 현장시험 당일의 조수간만의 차 및 방류수량이 요구조건에 미치지 못하여 최소출력시험에서 확인된 시험결과와 수차성능특성곡선을 이용하여 환산된 출력 및 효율로 대체하였으며, 성능시험 방법 및 결과에 대한 상세한 설명에 대해서는 참고문헌 (10)을 참고하기 바란다.

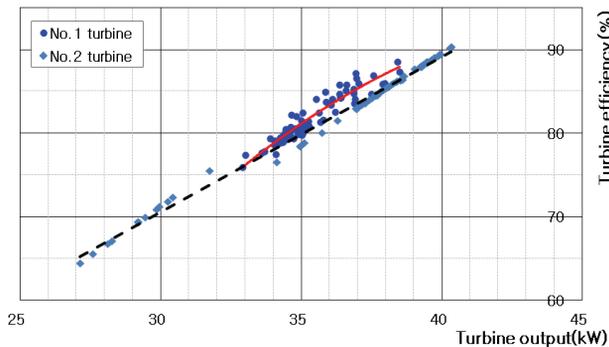


Fig. 9 Efficiency curve of test turbines No. 1 & 2 by output power variation at the corrected effective head of 2.0m

Table 2 Resultant averaged efficiency at the rated output power

Corrected head (m)	Efficiency of turbine No. 1 at rated output power(%)	Efficiency of turbine No. 2 at rated output power(%)
2.0	79.53	79.83

Fig. 9는 현장시험의 최소 출력시험에서 계측된 낙차와 출력 값을 모델시험을 통하여 얻어진 예상성능곡선을 이용하여 정격낙차 2.0m로 보정하여 나타낸 수차 1호기 및 2호기에서의 보정된 효율을 나타내고 있다.

1호기와 2호기의 동시 운전 중에 측정된 데이터를 근거로 작성이 되었으며, 2호기의 경우 유입관측 상부수조에서 발생하는 자유수면 와류의 영향으로 출력 값의 분포범위가 상대적으로 넓게 나타나고 있다.

한편, 현장시험에 의한 성능시험의 결과로부터 수차효율에 대해서 검토해보면 수차의 보증효율은 수력발전소 발주자의 요구에 의해 80%로 설정되었고, Table 2에 정리된 환산 낙차 2m에서의 수차 평균효율에서 수차출력의 측정 불확도가  $\pm 1.8\%$ 임<sup>(10)</sup>을 감안하면 수차의 평균효율은 1호기 77.7~81.3%, 2호기 78.0%~81.6%이므로 보증효율을 만족시킴을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 연구는 양어장 해수 방류수를 이용한 해양소수력발전소 구축에 관한 전체과정에 대해서 검토한 결과이며, 발전소 입지조건, 해수면 변동에 따른 수차 유효낙차, 수차발전기 설계, 발전소 토목공사, 수차 성능시험 등에 대한 내용에 대해서 구체적으로 검토한 것이다. 양어장 방류수를 이용한 해양소수력발전소의 설계는 방류수량 및 조수간만에 따른 수차 방출구의 해수면 변동에 의한 유효낙차의 변화를 정확하게 검토하여야 한다. 또한 발전소 설치지점의 환경적 조건을 고려하여 수차를 선정해야 하며, 발전소 건설 과정에서도 설치지점 주위의 환경 및 생태적인 요인을 고려하여 발전소를 설치해야 한다. 특히, 제주도 지역은 토양이 현무암으로 구성되어 있기 때문에 기초공사 시에는 지반 특성상 현무암 자갈층 사이로 용출수가 발생하는 문제점에 대한 대책을 강구해야 한다.

### 참고문헌

(1) Tsukamoto, T., Inagaki, M., Watanabe, T., Yamamoto, T. and Nishi, M., 2004, "Characteristics of a Micro Tubular Turbine for the Serial Arrangement," Turbomachinery, Vol 32, No. 3, pp. 176~182.

- (2) Nam, S.-H., Kim, Y.-T., Choi, Y.-D. and Lee, Y. -H., 2008, "Internal Flow Analysis of a Tubular-type Small Hydroturbine by Runner Vane Angle," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 32, No. 7, pp. 1044~1050.
- (3) Kurokawa, J., Matsui, J. and Choi, Y. -D., 2008, "Flow Analysis in Positive Displacement Micro-Hydro Turbine and Development of Low Pulsation," International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 1, pp. 76~85.
- (4) Khosrowpanah, S., Fiuzat, A. A. and Albertson, M. L., 1988, "Experimental Study of Cross-Flow Turbine," Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 3, pp. 299~314.
- (5) Fiuzat, A. A. and Akerkar, B. P., 1991, "Power Outputs of Two Stages of Cross-Flow Turbine," Journal of Energy Engineering, Vol. 117, No. 2, pp. 57~70.
- (6) 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2008, 신·재생에너지 RD&D 전략 2030 시리즈 5 소수력.
- (7) 제주스마트그리드실증단지, 2013, <http://smartgrid.jeju.go.kr>.
- (8) 국립해양조사원, 2013, 해양관측정보, <http://www.khoa.go.kr>.
- (9) 日本電氣學會, 1992, "JEC-4002 : 水車およびポンプ水車の効率試験方法," 電氣規格調査會標準規格.
- (10) 황영호, 이영호, 최영도, 2011, "해양소수력발전소 튜블러 수차 성능평가를 위한 현장시험," 한국마린엔지니어링학회지, 제35권, 제8호, pp. 1070~1077.