

소수력발전소의 성능예측 기법

박완순·이철영·

·한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부

A Study on the Performance Prediction Technique for Small Hydro Power Plants

Wan-Soon Park, Chul-Hyung Lee

·Renewable Energy Research Department, KIER
1-2 Jang-dong Yusong-ku Daejeon 305-343, Korea

ABSTRACT

This paper presents the methodology to analyze flow duration characteristics and performance prediction technique for small hydro power(SHP) plants and its application. The flow duration curve can be decided by using monthly rainfall data at the most of the SHP sites with no useful hydrological data.

It was proved that the monthly rainfall data can be characterized by using the cumulative density function of Weibull distribution and Thiessen method were adopted to decide flow duration curve at SHP plants. And, the performance prediction technique has been studied and development. One SHP plant was selected and performance characteristics was analyzed by using the developed technique. Primary design specifications such as design flowrate, plant capacity, operational rate and annual electricity production for the SHP plant were estimated. It was found that the methodology developed in this study can be a useful tool to predict the performance of SHP plants and candidate sites in Korea.

주요기술용어 : Small hydro power(소수력발전), Flow duration curve(유량지속곡선), Design flowrate(설계유량), Operational rate(가동율), Annual electricity production (연간 전기생산량)

1. 서 론

에너지 자원이 절대 부족하여 에너지 해외 의존도가 97% 이상인 우리나라에서는 에너지 해외 의존도를 경감시키고 에너지를 안정시키기 위하여 국내의 부존에너지를 최대한 활용하는 것이

매우 중요하다. 또한 지구 온난화에 대처하는 범 세계적인 규제에 대비하기 위하여, 청정한 에너지를 적극 개발하여 에너지 자립도를 향상시켜야 한다. 소수력 자원은 다른 대체 에너지원에 비하여 에너지 밀도가 매우 높기 때문에 개발할 가치가 큰 부존자원으로 평가되고 있다. 정부에서는

1970년대 두 차례의 석유파동 이후 석유를 대체할 수 있는 대체에너지 개발의 일환으로 소수력 개발 방안(1982.3), 대체에너지개발 촉진법(1987.12) 및 동법시행령(1988.5)을 제정 공포하여, 민간자본에 의하여 소수력 발전소를 개발할 수 있도록 하였다. 그 결과 30개 지점에 약 43,000kW의 소수력 발전소가 개발되어 연간 약 1억kWh의 전력을 생산하고 있다.

소수력 발전은 다른 발전방식에 비해 환경에 대한 영향이 거의 없어 깨끗하고 재생이 가능한 에너지로 그 경제성은 발전지점의 특성, 개발형식, 설비용량 등에 따라 큰 영향을 받는다. 따라서 효과적인 소수력 개발을 위해서는 영향인자들에 대한 정확한 분석이 수행되어야만 한다¹⁾.

유량의 실측자료가 매우 부족하여 개발지점의 계측자료를 이용할 수 없는 소수력 개발의 경우 시간과 경비 등 여러 가지 제한을 고려할 때 수문학적 근거에 바탕을 둔 비교적 간편한 기상 및 지형정보와 경험적인 가정치만을 요구하는 방법 등을 개발하여 이용하는 것이 바람직할 것이다^{2,7)}.

따라서 본 연구는 소수력 발전소의 성능예측 기법을 구축하기 위한 것이며, 이와 같이 구축된 성능예측 기법을 기존 소수력 발전소 등에 적용하여 기법의 신뢰성을 확인하였다.

2. 소수력 발전소의 성능예측 기법 구축

2.1 소수력 발전소의 유량지속특성

소수력 개발 지점에서의 사용 유량을 결정하는 최선의 방법은 해당 지점에 유속계 또는 수위계를 사용하여 장시간에 걸친 측정결과를 분석하여 사용 유량을 결정하는 것이 최선의 방법이다³⁾. 그러나 이러한 방법은 장기간에 걸친 작업을 요하므로 인원 및 장비에 따른 경제적인 문제가 따르고 소수력 개발 지점에 대한 특성을 단기간에 분석하기에는 부적합하기 때문에 후보지 인근의 강우 관측소에서 측정된 강우 자료를 이용하게 된다.

소수력 개발 지점에서의 유량지속곡선을 나타

내는 유량지속곡선함수 $D(q_i)$ 는 이철형 등²⁾에 의하면 누적분포함수 $F(q_i)$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$D(q_i) = W_i - F(q_i) = \sum W_i \exp - \left(\frac{q_i}{\beta_i} \right)^{\alpha_i} \quad (1)$$

2.2 소수력 발전소의 성능예측

소수력 발전시스템은 유량과 낙차로부터 에너지를 추출하는 것으로 소수력 발전소에서 얻을 수 있는 순수한 소수력 에너지 P_i 는 다음과 같다⁴⁾.

$$P_i = \rho g Q H \quad (2)$$

Fig. 1은 단위 낙차, 단위 시간당 단일기의 소수력 발전시스템에 대해 유량변화에 따른 출력의 변화를 나타내는 그림이다²⁾.

소수력 발전소를 통과하는 유량은 계절별, 월별로 다르기 때문에 순수한 소수력 에너지와 소수력 발전시스템에서 발생하는 에너지는 쉽게 구할 수 없다. 이 값들을 해석적으로 구하기 위해서

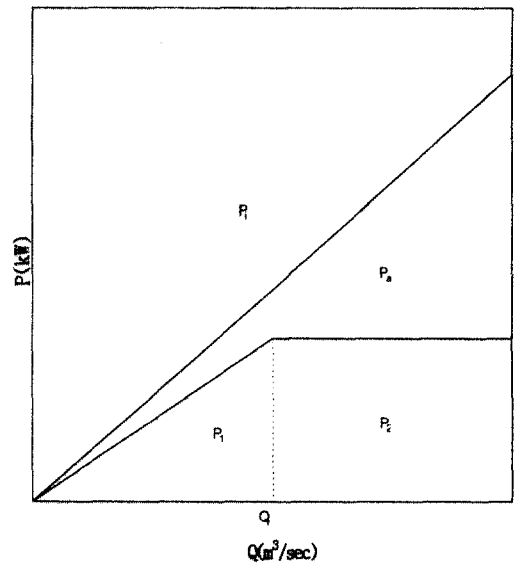


Fig. 1. Power characteristics of SHP system

는 확률밀도함수를 이용하여야 한다. Weibull 확률밀도함수를 이용하여 소수력 발전소에서 얻을 수 있는 단위시간당 생산되는 평균 전기에너지양 P_a 를 구하면 다음과 같다.

$$P_a = \rho g H \sum \int_0^{Q_r} \eta_s A_i q_i P(q_i) dq_i + \rho g H \eta_s Q_r \sum \int_{Q_r}^{\infty} P(q_i) dq_i \quad (3)$$

식 (3)의 첫 항에서 η_s 는 유량에 따라 변하는 값이지만 큰 변화가 없다고 가정하여 적분식 밖으로 빼내어 정리하면,

$$P_a = \rho g H \eta_s \left[\sum \int_0^{Q_r} A_i q_i P(q_i) dq_i + Q_r \sum \int_{Q_r}^{\infty} P(q_i) dq_i \right] = \rho g H \eta_s (S_1 + S_2) = P_1 + P_2 \quad (4)$$

여기서 P_1, P_2 는 각각 소수력 발전시스템의 부분 및 정격출력을 나타낸다.

소수력 발전소의 설비용량 C , 연평균가동율 L_f , 연간에너지생산량 E_a 는 다음과 같이 산정된다.

$$C = \rho g H_e Q_r \eta_s \quad (5)$$

$$L_f = (S_1 + S_2) / Q_r \quad (6)$$

$$E_a = 8,760 C L_f \quad (7)$$

2.3 소수력 발전소의 출력 저하량 예측

낙차변화를 고려한 실제 가동율은 다음과 같이

표시할 수 있다.

$$L_R = L_A \times (1 - \Delta L_f) \quad (8)$$

여기서, 가동율 저하율 ΔL_f 는 실제 운영중인 소수력 발전소의 운전율을 참고하여 결정할 수 있다. 실제 운영중인 소수력 발전소의 운전율을 참고하여 선형 회기분석한 결과는 Fig. 2와 같으며, 이때 가동율 저하율 ΔL_f 은 식(9)와 같이 유효낙차의 함수로 표시된다.

$$\Delta L_f = -0.1825 H_e + 7.3989 \quad (9)$$

3. 소수력발전소의 성능예측 영향인자 검토

소수력발전소의 성능에 영향을 주는 인자로는 유출계수⁵⁾, Weibull 분포의 형상계수 (α) 및 Weibull분포의 척도계수 (β) 등을 들 수 있으며, 이들 인자들이 각각 유량지속특성과 시스템의 가동율에 미치는 영향을 분석하였다.

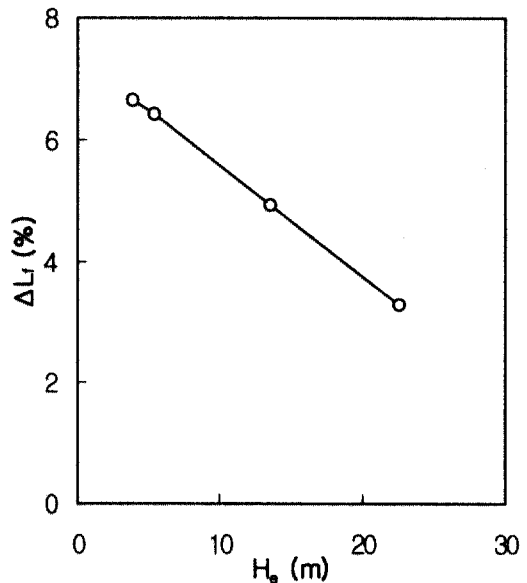


Fig. 2. Linear regression of decreasing operational rate.

3.1 유출계수

3.1.1 유량지속특성과의 관계

유출계수의 유량지속특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 한강수계에 위치한 유역면적이 634.6km²인 평창강 유역을 선정하였으며, 형상계수 α 와 척도계수 β 가 일정하고, 낙차 H 와 시스템 효율 η_s 가 일정할 때 유출계수 변화에 따른 유량지속곡선의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타난 바와같이 유출계수의 변화에 따라 유량지속특성이 크게 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 소수력개발 지점에서의 유출계수 k 가 소수력발전소의 초기설계와 성능에 큰 영향을 주게된다.

3.1.2 시스템 가동율과의 관계

평창강 유역의 형상계수 α 와 척도계수 β 가 일정하고, 낙차 H 와 시스템효율 η_s 가 일정할 때 유출계수 변화에 따른 가동율의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 표시된 바와같이 동일 유량 조건에서 유출계수 k 가 클 수록 가동율이 증

가됨을 알 수 있다.

3.1.3 설계유량 산정을 위한 정격출력과의 관계

Fig. 5는 평창강 유역에 대하여 유출계수 변화에 따른 설계유량 산정의 지표가 되는 정격출력 P_2 의 최대값⁶⁾ 변화를 나타내고 있다. Fig. 5에서와 같이 평창강 유역의 유출계수 k 가 0.7, 0.6, 0.5 일때 각각 33.60 kW, 28.80 kW, 24.0 kW가 되며, 유출계수 변화에 따른 유량은 각각 19.0 m³/sec, 16.5 m³/sec, 13.5 m³/sec가 된다. 따라서 해당유역의 유출계수값에 따라 설계 및 성능에 큰 영향을 주는 요인임을 알 수 있다.

3.2 Weibull 분포의 형상계수 (α)

3.2.1 유량지속특성과의 관계

평창강 유역의 유출계수 k 와 척도계수 β 가 일정하고, 낙차 H 와 시스템효율 η_s 가 일정할 때 형상계수 α 변화에 따른 유량지속곡선의 변

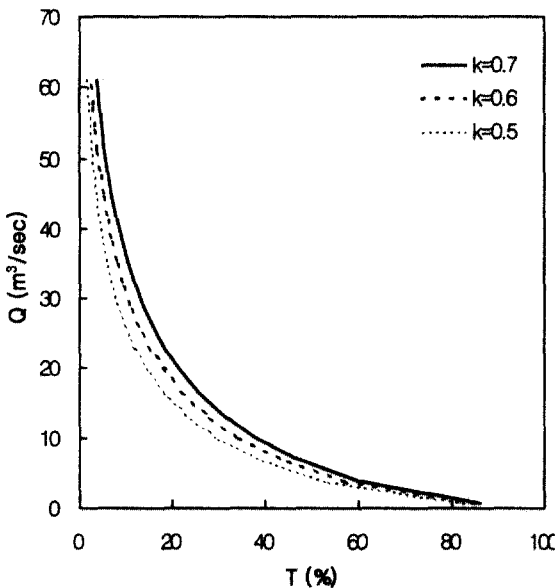


Fig. 3. Flow duration characteristic versus runoff coefficient.

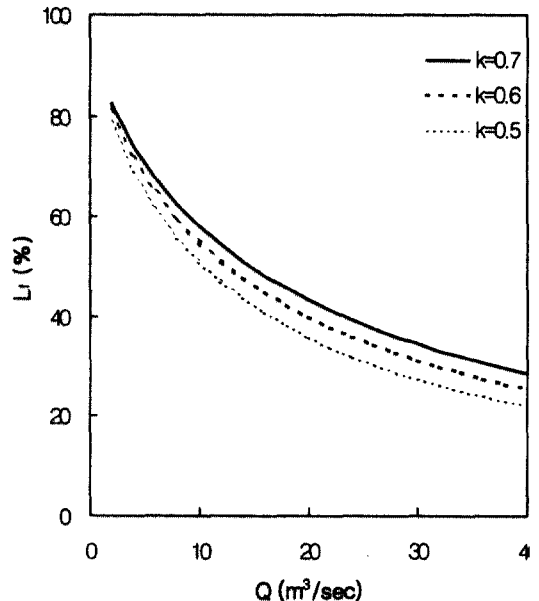


Fig. 4. Operational rate versus runoff coefficient.

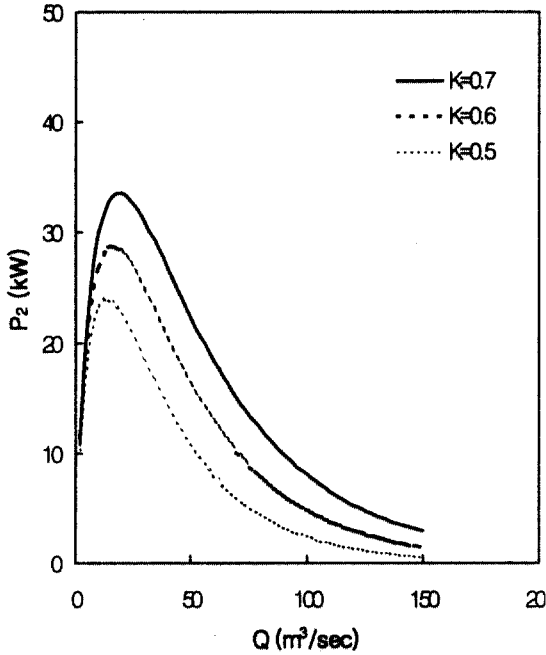


Fig. 5. Rated power versus runoff coefficient.

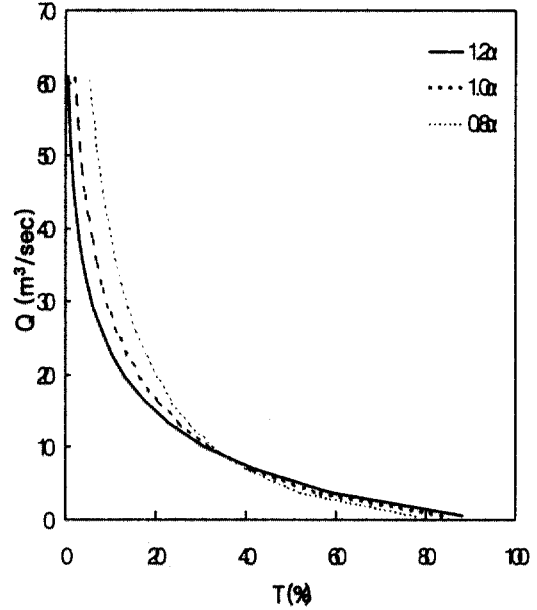


Fig. 6. Flow duration characteristic versus shape parameter.

화를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 평창강 유역의 설계유량 $14.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 점을 기준으로 하여 강우특성을 나타내는 형상계수 α 변화에 따른 유량지속 특성은 형상계수 α 가 1.2α , 1.0α , 0.8α 일 때 유량지속특성인 시간비가 각각 21.8%, 24.2%, 26.6%로 형상계수의 값이 감소함에 따라 시간비가 증가함을 알 수 있다. 따라서 형상계수의 변화에 따라 유량지속 특성이 변화됨을 알 수 있다.

3.2.2 시스템 가동율과의 관계

평창강 유역의 유출계수 k 와 척도계수 β 가 일정하고, 낙차 H 와 시스템효율 η_s 가 일정할 때 형상계수 α 변화에 따른 가동율의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에 표시된 바와 같이 평창강 유역의 설계 유량 $14.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 에서 형상계수 α 가 각각 0.8

α , 1.0α , 1.2α 일 때 가동율은 각각 47.0%, 45.9%, 44.6%가 된다. 이와같이 형상계수도 유출계수와 마찬가지로 시스템가동율 등 성능에 영향을 주는 요인임을 알 수 있다.

3.3 Weibull분포의 척도계수 (β)

3.3.1 유량지속특성과의 관계

평창강 유역의 유출계수 k 와 형상계수 α 가 일정하고, 낙차 H 와 시스템효율 η_s 가 일정할 때 척도계수 β 변화에 따른 유량지속곡선의 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 평창강 유역의 설계유량인 $14.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 점을 기준으로 하여 강우특성을 나타내는 척도계수 변화에 따른 유량지속특성은 척도계수 β 가 1.2β , 1.0β , 0.8β 일 때 시간비가 각각 28.5%, 24.2%, 19.2%로 척도계수값이 감소함에 따라 시간비도 감소함을 알 수 있다. 따라서 해당 유역의 척도계수 변화에 따라 유량지속특성이 차

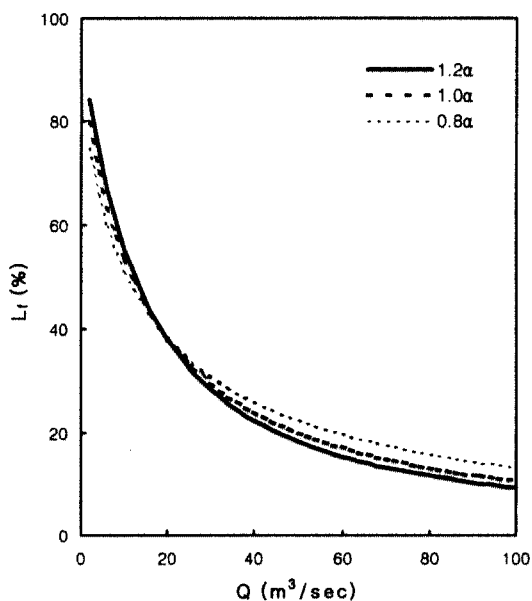


Fig. 7. Operational rate versus shape parameter.

이가 남을 알 수 있다.

3.3.2 시스템 가동율과의 관계

평창강 유역의 유출계수 k 와 형상계수 a 가 일정하고, 낙차 H 와 시스템효율 η_s 가 일정할 때 척도계수 β 변화에 따른 시스템 가동율의 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 평창강 유역의 설계 유량 $14.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 에서 척도계수 β 가 각각 0.8β , 1.0β , 1.2β 일때 가동율은 각각 41.0%, 45.9%, 49.9% 가 된다. 척도계수 변화에 따른 가동율 감소율은 척도계수가 1.2β 일 때를 기준으로 척도계수가 1.0β 일 경우는 8.0%, 척도계수가 0.8β 일 경우는 17.8% 정도가 된다. 이와같이 척도계수도 시스템 가동율 등 성능에 영향을 주는 요인임을 알 수 있다.

4. 성능예측 기법의 검토 및 결과

4.1 A 소수력 발전소

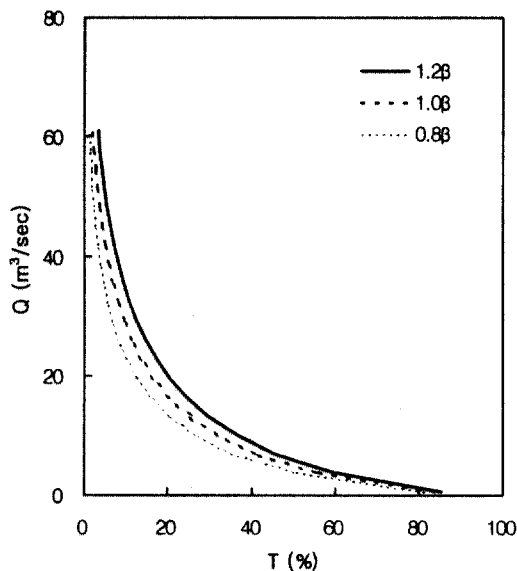


Fig. 8. Flow duration characteristic versus scale parameter.

A 소수력 발전소는 낙동강 수계의 상류에 위치하며, 초기 설계 제원은 Table 1과 같이 요약된다. Fig. 10은 A 소수력 발전소 지점에서의 유량지

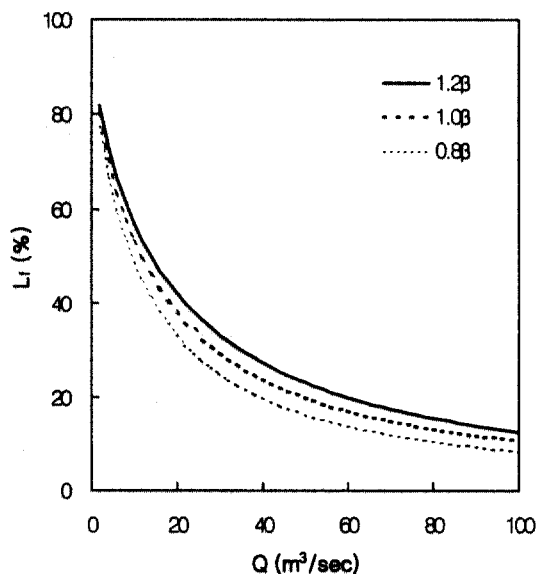


Fig. 9. Operational rate versus scale parameters.

Table 1. Initial design specification of A SHP plant

Parameters	Initial design values
$A(km^2)$	845.6
$Q_r(m^3/sec)$	17.8
$H_e(m)$	13.6
$P(kW)$	2,000.0

속곡선⁵⁾을 나타낸다. A 소수력 발전소의 설계유량은 $17.8 m^3/sec$ 로써 유량지속곡선상의 시간비가 21.8%에 해당하는 유량을 설계유량으로 선정하여 발전소를 설계하였음을 알 수 있다.

Fig. 11은 A 소수력 발전소 지점의 경우, 설계유량의 변화에 따른 연 평균가동율, 설비용량 및 연간 발전량의 변화를 나타내는 그림이며, 발전소의 특성에 대해 유용한 자료로 활용되는 연평균 가동율, 설비용량, 연간 발전량 등에 대한 자료를 획득할 수 있게 된다.

A소수력 발전소의 초기 설계제원으로 유효낙차

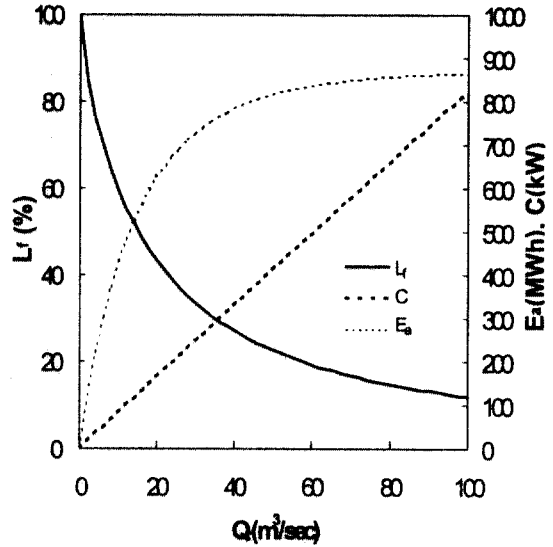


Fig. 11. Performance characteristics at A SHP site.

는 $13.63 m$ 를 적용하였다. Table 1에서 설계유량은 $17.8 m^3/sec$ 이므로, Fig. 10에서와 보는 바와 같이 유량지속곡선상의 시간비는 21.8%이고, Fig. 11로부터 연 평균 가동율은 46.2%, 연간 예상 발전량은 $8,094.0 MWh$ 로 산정됨을 알 수 있다.

4.2 A 소수력 발전소의 연평균 가동율 및 발전량 분석

Fig. 12는 본 연구를 통하여 개발된 소수력 발전소의 성능예측 기법을 이용한 A 소수력 발전소의 성능예측 결과를 나타낸다. 여기서 낙차와 효율이 일정할 경우와 변화할 경우의 가동율, 연간 전기생산량 등 제반 성능을 알 수 있다. 또한 Fig. 13은 A 소수력 발전소의 1989년부터 2000년까지 12년간의 실제 운영실적과 성능예측 결과를 비교한 것으로서 성능예측결과가 실제운영실적과 근사함을 나타내주고 있다.

5. 결 론

미계측 하천에 위치하게 되어 수문자료가 부족

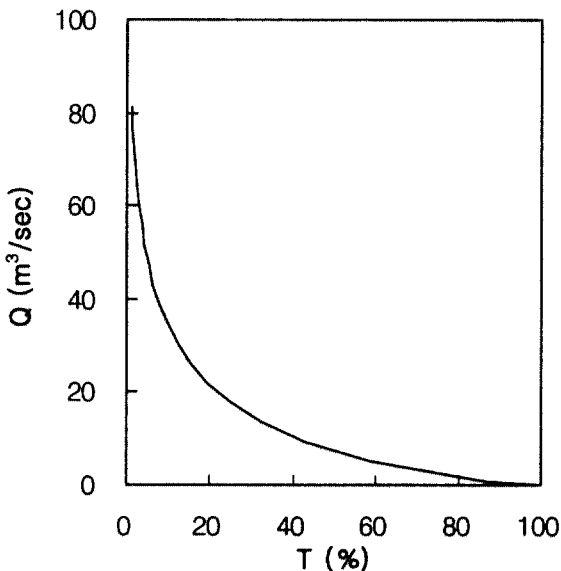


Fig. 10. Flow duration curve at A SHP site.

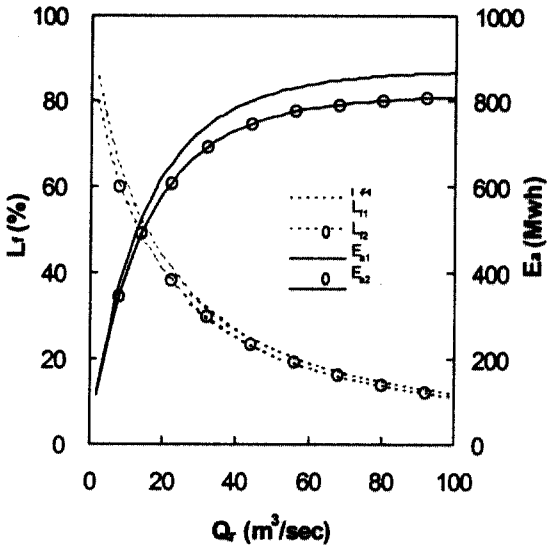


Fig. 12. Performance prediction at A SHP plant.

한 소수력 개발 지점에 대한 유량지속곡선 작성, 성능 및 출력 저하량 예측 기법이 조합된 소수력 발전소의 성능예측 기법을 구축하였고, 이를 기존 운영중인 소수력 발전소에 적용한 결과 기법의 신뢰성이 확보되었다. 따라서 본 연구의 결과를 이용함으로써 신규 소수력 개발시에 정확한 초기 설계와 성능예측으로 해당구역의 합리적인 수자원 이용이 가능하게 되었다.

참고 문헌

- 1) 차종희 외, 소수력발전의 설계에 관한 연구, 대한전기협회, 조사연구논문, 1982.
- 2) 이철형 외, 소수력발전소 건설 타당성조사 기본계획 연구, 한국에너지기술연구소, 연구보고서, 1997.
- 3) 石崎彰, 古市正敏, 小水力發電 讀本, オ-ム社, 1981.

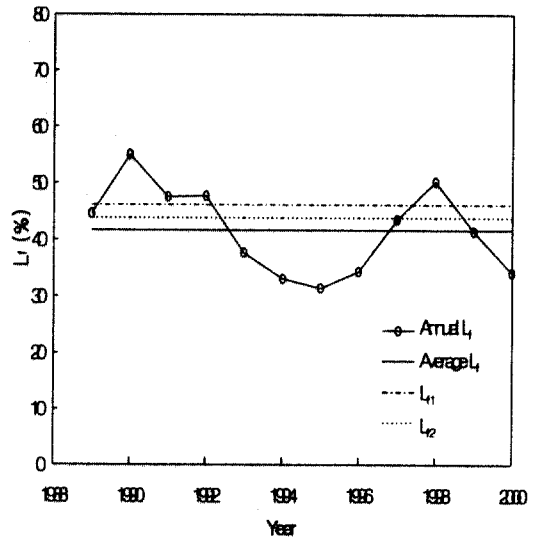


Fig. 13. Performance evaluation at A SHP plant.

- 4) 박완순, 이철형, 심명필, "국내 소수력발전 입지의 개발타당성 분석", 대한토목학회 논문집, Vol. 17, No. II-3, 1997, pp. 197-205.
- 5) 김 승, "우리나라 수자원 정책의 문제점과 대안", 물위기 시대 우리나라 수자원 정책, 환경정책 시민연대, 2000, pp 187-201.
- 6) Park, Wan-Soon, Lee, Chul-Hyung, and Jeong, Sang-Man(2001), "An Analysis of Performance Characteristics for Small Hydro Power Plants", KWRA, Vol. 2, No. 1, 2001, pp. 11-19.
- 7) Robert Noyes, Small and Micro Hydro-Electric Power Plants "Technology and Feasibility", Energy Technology Review, No.60, Noyes Data Corporation, U.S.A., 1980, pp. 165-171.