

유입량변화에 의한 소수력발전소의 수문학적 성능특성 변화**Hydrologic Performance Characteristics Variation of Small Scale Hydro Power Plant with Variation of Inflow**

박 완 순* / 이 철 형**

Park, Wan Soon / Lee, Chul Hyung

Abstract

The variation of inflow at stream and hydrologic performance for small scale hydro power (SSHP) plants due to variation of inflow have been studied. The model, which can predict flow duration characteristic of stream, was developed to analyze the variation of inflow caused from rainfall condition. And another model to predict hydrologic performance for SSHP plants is established. Monthly inflow data measured at Andong dam for 32 years were analyzed. The existing SSHP plant located in upstream of Andong dam was selected and analyzed hydrologic performance characteristics. The predicted results from the developed models in this study show that the data were in good agreement with measured results of long term inflow at Andong dam and the existing SSHP plant. Inflow and ideal hydro power potential had increased greatly in recent years, however, these did not lead annual energy production increment of existing SSHP plant. As a results, it was found that the models developed in this study can be used to predict the primary design specifications and inflow of SSHP plants effectively.

Keywords : small scale hydro power, flow duration, inflow, design flowrate, rainfall condition

요 지

하천의 유입량 변화와 이로 인한 소수력발전소의 수문학적 성능변화에 대한 연구가 수행되었다. 하천에서의 유입량변화를 분석하기 위하여 유량지속특성을 예측할 수 있는 모델이 개발되었고, 이를 기반으로 하여 소수력발전소의 수문학적 성능특성을 예측할 수 있는 모델이 개발되었다. 개발된 모델의 효용성을 확인하기 위하여 안동댐에서 32년간 측정된 월 유입량자료를 분석하였으며, 안동댐 상류에 위치한 소수력발전소를 대상으로 하여 수문학적 성능특성을 분석하였다. 안동댐에서의 장기유입량과 기존의 소수력발전소를 대상으로 분석한 결과, 본 연구에서 개발된 예측모델로부터 획득한 결과가 실측자료와 잘 일치하였다. 최근 유입량증가로 인하여 소수력가용량을 증가하였으나 기존의 소수력발전소의 가동률을 증가시키지는 못한 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 모델은 소수력발전소의 초기설계제원과 유입량을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다는 것이 밝혀졌다.

핵심용어 : 소수력, 유량지속, 유입량, 설계유량, 강우상태

* 한국에너지기술연구원 책임연구원
Researcher, Korea Institute of Energy Research (e-mail: pwsn@kier.re.kr)

** 교신저자, 한국에너지기술연구원 책임연구원
Corresponding author, Researcher, Korea Institute of Energy Research (e-mail: lchg@kier.re.kr)

1. 서론

소수력자원은 에너지 밀도가 매우 높기 때문에 개발할 가치가 큰 부존자원으로 평가되고 있다. 소수력발전의 경제성은 개발입지의 특성, 개발형식, 설비용량 등에 따라 큰 영향을 받는다. 효과적인 소수력발전소를 개발하기 위해서는 이들 영향인자들에 대한 정확한 분석이 수행되어야 한다(김길호 등, 2007; 이충성 등, 2007).

대부분의 소수력발전입지는 하천의 상류에 위치하고 있으며, 유입량에 관한 실측자료가 부족한 실정이다. 소수력발전입지에서의 사용유량을 결정하는 최선의 방법은 해당 지점에서 장기간에 걸쳐 유입량을 측정하고 분석하여 유량지속특성을 분석하고 이를 통하여 사용유량을 결정하는 것이다(Noyes, R. 1980). 그러나 이러한 방법은 수행 인원 및 사용장비 등에 따른 경제적인 문제가 따른다. 이와 같은 제한점을 해결하기 위하여 수문학적인 계측자료가 부족한 우리나라의 소수력발전입지에 대한 수문학적 특성을 분석하기 위한 해석방법이 연구되어 왔다(Lee and Park, 1992; 박완순 등, 1997; Park et al., 2001).

본 연구는 유입량의 변화가 소수력발전소의 수문학적 성능특성에 미치는 영향을 분석한 것이다. 본 연구에서는 유입량 등에 관한 수문자료가 부족한 소수력발전소에서 유량지속특성을 예측할 수 있는 분석모델을 정립하고, 이를 소수력발전소의 성능특성과 결합한 소수력발전소 성능예측모델을 통하여 유입량변화가 소수력발전소의 수문학적 성능특성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 위하여 안동댐으로 유입되는 32년간의 장기유입량자료를 수집·분석하여 예측모델로부터 획득한 자료를 비교 분석하였다. 또한 안동댐 상류에 위치한 소천소수력발전소를 대상으로 수문학적 성능특성의 변화를 도출하여 분석하였다.

2. 유량지속특성 예측모델

하천에서의 연평균유입량 Q_a (m^3/s)은 해당구역의 연평균강수량 R_t (mm)와 유역면적 A (km^2) 그리고 유출계수 k 로부터 다음과 같이 산정된다(차중희와 박인용, 1982).

$$Q_a = \frac{R_t \times 10^{-3} \times A \times 10^6 \times k}{365 \times 24 \times 60 \times 60} \quad (1)$$

유출계수 k 가 연중 일정한 값을 유지한다면 하천에서의 월평균유입량 Q_m (m^3/s)은 다음과 같이 산정된다.

$$Q_m = \frac{R_m \times 10^{-3} \times A \times 10^6 \times k}{30.42 \times 24 \times 60 \times 60} \quad (2)$$

Eq. (2)를 이용하여 관측소에서 측정된 월강수량자료

R_m (mm)를 월평균유입량 Q_m (m^3/s)으로 환산할 수 있으며, 이를 이용하여 유량지속곡선을 작성할 수 있다. 유량지속곡선은 유입량을 크기별로 누적시킨 것으로 특정한 누가분포함수의 형태로 표시할 수 있다.

본 연구에서는 월강수량자료를 월평균유입량 자료로 환산하여 구해진 유량지속곡선을 Weibull 분포의 누가분포함수를 이용하여 특성화하였다. Weibull 분포의 누가분포함수 ($F(Q)$)는 다음과 같이 표시된다.

$$F(Q) = \int_0^Q P(Q) dQ = 1 - \exp(-(Q/\beta)^\alpha) \quad (3)$$

여기서 α 와 β (m^3/s)는 각각 Weibull 분포의 형상모수와 척도모수를 나타낸다.

소수력발전소에서의 유량지속곡선을 나타내는 유량지속함수 ($D(Q)$)는 누가분포함수와의 관계를 통하여 다음과 같이 구해진다(한국에너지기술연구소, 1992; 1997).

$$D(Q) = 1 - F(Q) = \exp(-(Q/\beta)^\alpha) \quad (4)$$

3. 소수력발전소의 성능예측모델

Fig. 1은 낙차가 일정한 경우, 유입량변화에 따른 소수력발전소의 출력의 변화를 나타내는 것으로, 월류댐을 갖는 소수력발전소의 특성을 나타내는 그림이다.

소수력발전소에서 얻을 수 있는 소수력가용량 P_{ia} (kWh)를 구하면 다음과 같다.

$$P_{ia} = \rho g H \eta \int_0^\infty P(Q) Q dQ \quad (5)$$

여기서 ρ (kg/m^3), g (m/s), H (m), η (%), $P(Q)$ 그리고 Q (m^3/s)는 각각 물의 밀도, 중력가속도, 낙차, 소수력발전소의 효율, Weibull 분포의 확률밀도함수 그리고 유입량을 나타내며, 확률밀도함수 $P(Q)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$P(Q) = (\alpha/\beta) (q/\beta)^{\alpha-1} \exp(-(Q/\beta)^\alpha) \quad (6)$$

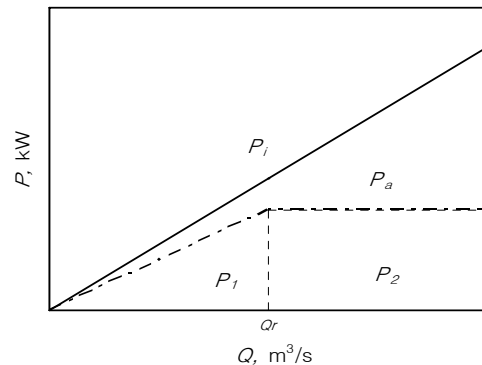


Fig. 1. Output of SSHP Plant

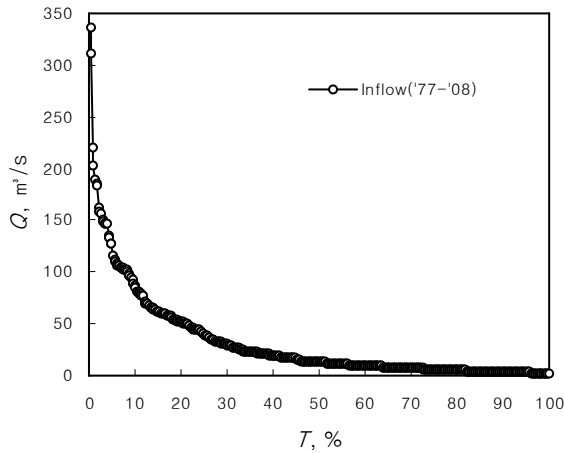


Fig. 2. Long Term Flow Duration Characteristic at Andong Dam

소수력발전소는 월류댐을 사용하기 때문에 설계유량 이하의 유입량은 모두 에너지로 변환할 수 있으나, 설계 유량 이상의 유입량의 경우에는 설계유량에 해당되는 유입량만을 사용하고 초과되는 유입량은 월류댐 상단을 통하여 방류하게 된다. 소수력발전소에서 얻을 수 있는 단위시간당 출력량 P_a (kWh)를 구하면 다음과 같다.

$$P_a = \rho g H \eta \int_0^{Q_c} P(Q) Q dQ + \rho g H Q_c \eta \int_{Q_c}^{\infty} P(Q) dQ = P_1 + P_2 \quad (7)$$

여기서 Q_c (m^3/s), P_1 (kWh) 그리고 P_2 (kWh)는 각각 소수력발전소의 설계유량, 부분출력량 및 정격출력량을 나타낸다.

소수력발전소의 시설용량 C (kW), 가동률 L_f (%)와 연간출력량 E_a (kWh)는 다음과 같다 (박완순, 이철형, 2008).

$$C = \rho g H Q_c \eta \quad (8)$$

$$L_f = P_a / C \quad (9)$$

$$E_a = 8,760 C L_f \quad (10)$$

4. 안동댐의 장기유입량 분석

본 연구에서는 유역면적이 1,584 km^2 인 낙동강 수계의 안동댐에서 32년간('77~'08) 실측된 유입량자료를 분석하였다.

Fig. 2는 안동댐의 장기유입량을 분석하여 작성한 유량 지속곡선을 보여주며, Fig. 3은 안동댐의 장기유입량자료를 10년 단위로 구분하여 기간별로 표시한 유량지속곡선이다. 기간별 유량지속곡선의 형태를 살펴보면, 최근 10년간의 유량지속곡선의 형태가 20~30년 전의 유량지속곡선의 형태와는 많이 다르게 나타나는 것을 알 수 있으며,

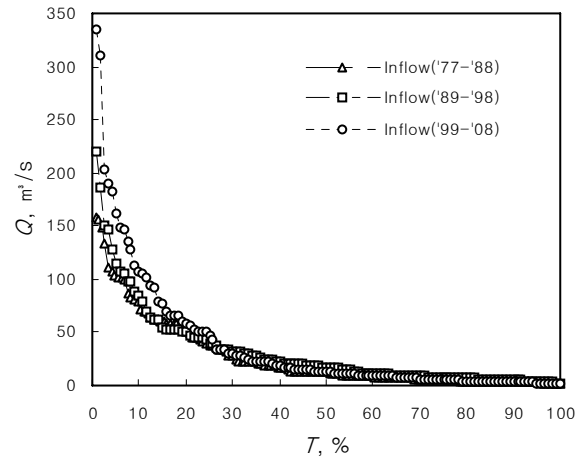


Fig. 3. Flow Duration Characteristic at Andong Dam

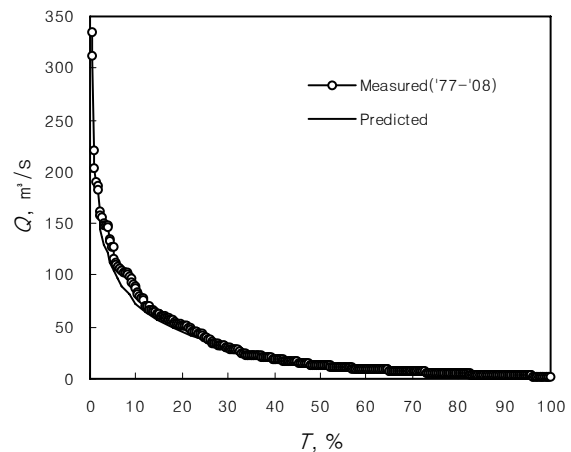


Fig. 4. Comparison of Flow Duration Characteristic at Andong Dam('77-'08)

최근 10년간의 호우빈도의 증가는 유입량증가를 수반하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 안동댐유역의 32년간 강우량분석 자료를 이용하여 유량지속특성을 예측한 것으로 유량지속특성 예측모델이 실제 유입량분석을 통하여 작성한 유량지속특성을 효과적으로 표현해 주고 있다는 것을 알 수 있다.

Figs. 5~7까지는 기간별 유량지속특성을 예측한 것으로, 그림들을 통하여 본 연구에서 개발한 유량지속특성 예측모델이 실제유입량의 분석을 통하여 얻은 유량지속특성을 효과적으로 표현한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 기간별 소수력가용량의 변화를 분석한 것이다. 기간별 소수력가용량은 '77~'88 기간의 경우 255.75 kWh, '89~'98 기간의 경우 268.5 kWh, '99~'08 기간의 경우 313.09 kWh로 나타나서 최근 10년간의 소수력가용량이 '77~'88 기간 및 '77~'88 기간에 비하여 5.0%, 22.4% 증가한 것으로 나타났다.

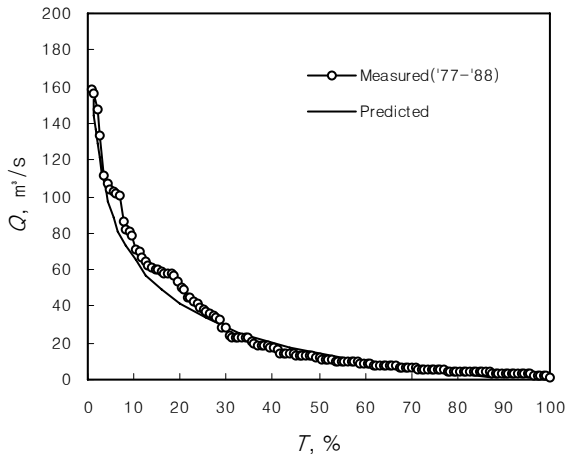


Fig. 5. Comparison of Flow Duration Characteristic at Andong Dam ('77-'88)

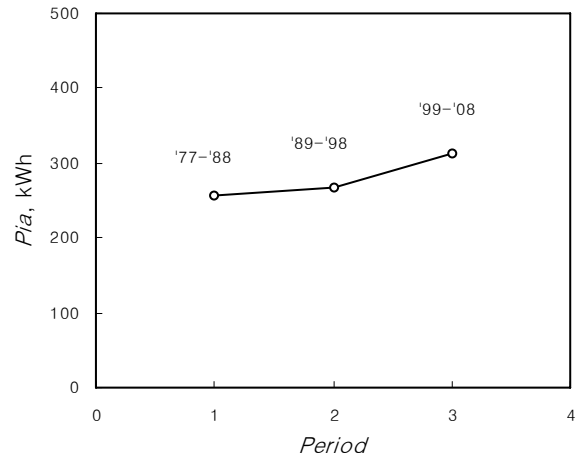


Fig. 8. Predicted Hydropower Potential Variation at Andong Dam

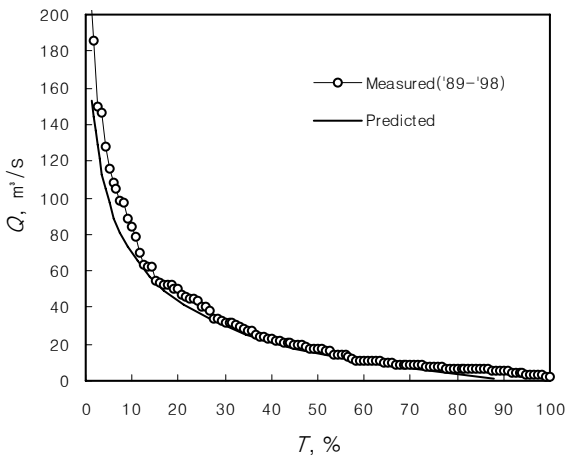


Fig. 6. Comparison of Flow Duration Characteristic at Andong Dam ('89-'98)

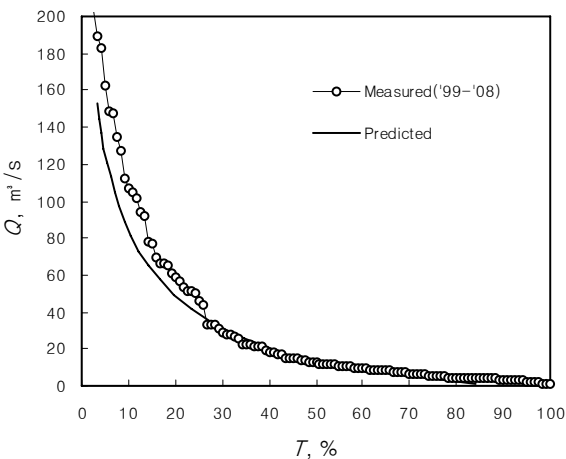


Fig. 7. Comparison of Flow Duration Characteristic at Andong Dam ('99-'08)

5. 소수력발전소의 성능특성변화

유입량의 변화가 소수력발전소에 미치는 영향을 분석하기 위하여 안동댐 상류에 위치한 소천소수력발전소를 대상으로 성능특성을 분석하였다. 소천소수력발전소의 설계제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Design Specifications at Sochun SSHP Plant

Q_r (m ³ /s)	H (m)	C (kW)	A (km ²)
12.5	22.5	2,400	533

Fig. 9는 소천소수력발전소에서의 기간별 유량지속특성을 예측한 것으로, 이를 통하여 최근 10년간의 강우형태는 강우량의 증가와 더불어 호우빈도가 증가하였다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 기간별 연간가동률의 변화를 나타내는 것으로, 소천소수력발전소의 설계유량이 12.5 m³/s이므로 '89~'98까지의 연간가동률은 47.7%, '99~'08까지의 연간가동률은 46.6%로 예측되어 가동률이 증가하지 않는다는 것을 보여준다. 이러한 현상은 기존의 소수력발전소가 월류댐을 채택하고 있어 강우량이 증가하여 유입량이 증가하여도 설계유량 이상의 유입량은 월류댐 상단으로 방류되기 때문이다.

Fig. 11은 기간별 연간에너지 생산량의 변화를 나타내는 것으로 연간가동률의 변화와 같이 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 기간별 정격출력량의 변화를 나타내는 것으로 최근 10년간의 강우형태 변화가 정격출력량이 최대값으로 결정되는 설계유량을 많이 변화시킨다는 것을 알 수

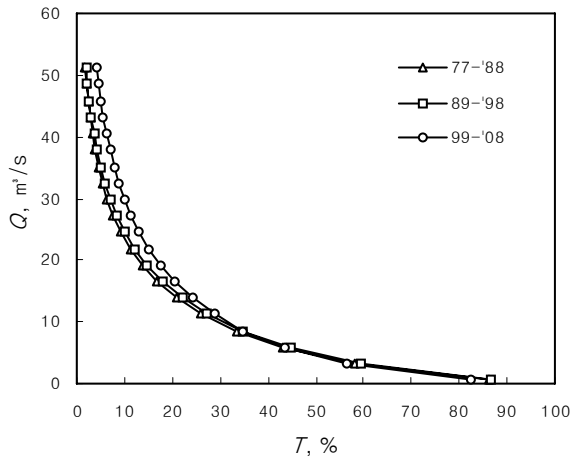


Fig. 9. Predicted Flow Duration Characteristics at Sochun SSHP Plant

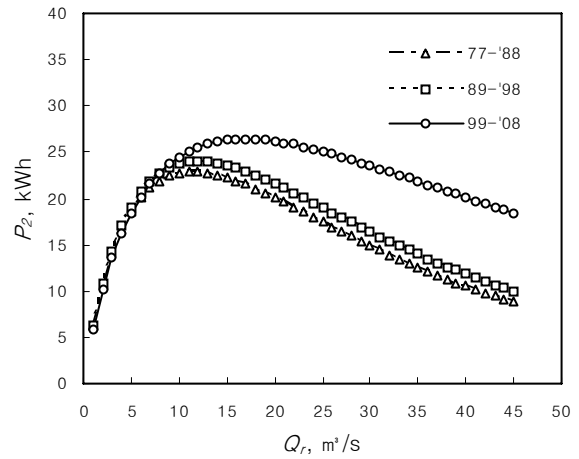


Fig. 12. Predicted Rated Output Variation at Sochun SSHP Plant

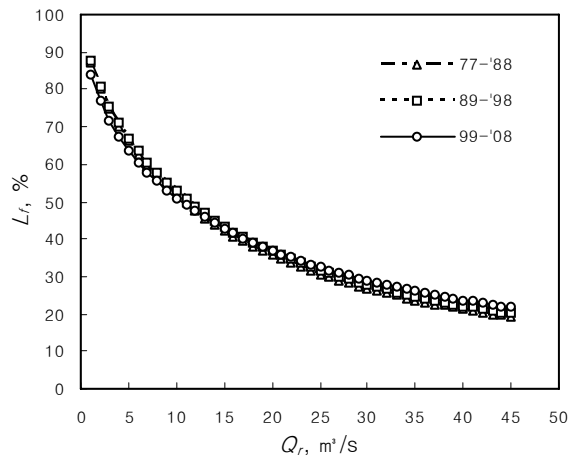


Fig. 10. Predicted Annual Load Factor Variation at Sochun SSHP Plant

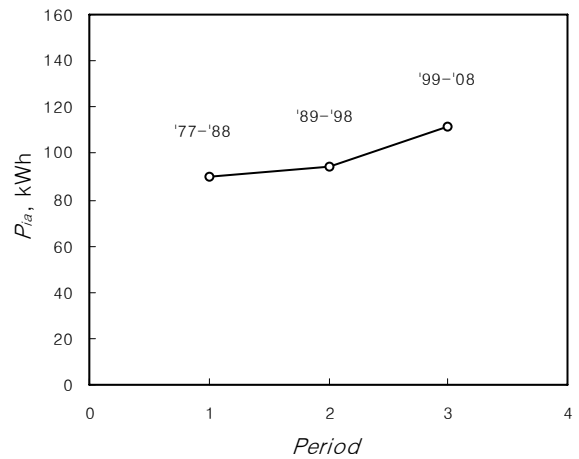


Fig. 13. Predicted Hydropower Potential Variation at Sochun SSHP Plant

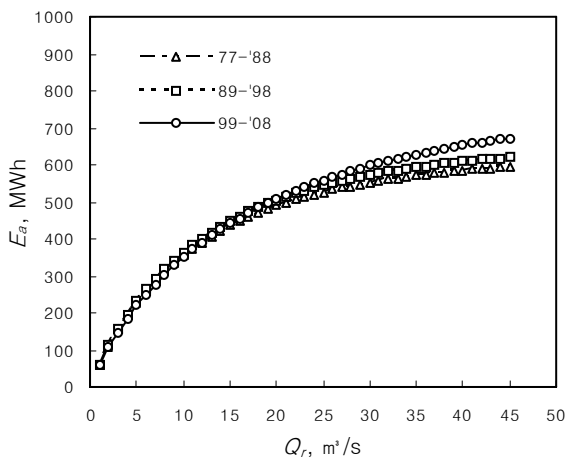


Fig. 11. Predicted Annual Energy Production Variation at Sochun SSHP Plant

있다. '89~'98기간의 경우, 설계유량이 12m³/s에서 정격 출력량이 최대가 되며, '99~'08기간의 경우에는 설계유량이 17m³/s에서 정격출력량이 최대가 되는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 강우형태의 변화로 인하여 신규로 소수력발전소를 건설할 경우에는 강우형태의 변화를 고려하여 기존의 소수력발전소에 비하여 설계유량을 크게 선정하여야 한다는 것을 나타낸다.

Fig. 13은 유량지속특성 예측모델을 사용하여 소천소수력발전소에서의 기간별 소수력가용량의 변화를 분석한 것이다. 기간별 소수력가용량은 '77~'88 기간의 경우 89.58kWh, '89~'98 기간의 경우 94.04kWh 그리고 '99~'08 기간의 경우 111.79kWh로 나타나서 최근 10년간의 소수력가용량이 '77~'88 기간 및 '77~'88 기간에 비하여 각각 5.0%, 24.8% 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 14는 20년간 측정된 소천소수력발전소의 연간가

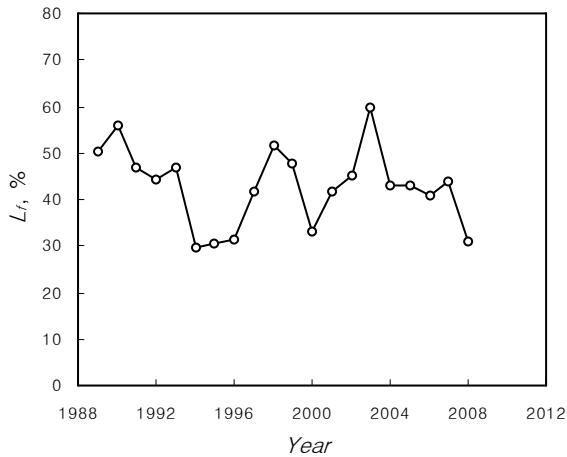


Fig. 14. Measured Annual Load Factor Variation of Sochun SSHP Plant

동률의 변화를 나타내는 것으로 '89~'98까지의 평균가동률은 42.98%, '99~'08까지의 평균가동률은 42.95%로 나타나 Fig. 13에서 분석된 최근 10년간의 강우량의 증가에 따른 소수력가용량의 증가가 실제 기존의 소수력발전소의 가동률을 증가시키지 않는다는 것을 보여준다.

6. 결 론

유입량의 증가가 소수력발전소의 수문학적 성능특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 본 연구에서 개발한 유량지속특성 예측모델과 소수력발전소의 성능분석모델이 소수력발전소의 수문학적 특성을 분석하는데 효과적으로 사용될 수 있다는 것이 밝혀졌다.

분석결과, 최근의 강우량 증가는 하천의 유입량과 소수력가용량을 증가시키지만, 소수력발전소는 월류뎀을 채택하기 때문에 기존의 소수력발전소의 가동률 향상에는 크게 기여하지 못하는 것으로 밝혀졌다.

또한 강우사상의 변화로 인하여 호우빈도가 증가함에 따라 신규로 설계하는 소수력발전소의 경우에는, 강우량의 변화를 고려하여 기존의 소수력발전소에 비하여 설계유량을 크게 선정하여야 하는 것으로 분석되었다.

정격출력량이 최대값을 나타내는 유입량을 설계유량으

로 선정할 경우, 주어진 소수력에너지를 효과적으로 사용할 수 있으며, 수문학적으로 최적의 설계상태임을 나타낸다.

참 고 문 헌

- 김길호, 이충성, 이진희, 심명필 (2007). "경제성분석에 의한 소수력개발의 최적규모 결정 방안". **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제12호, pp. 995-1005.
- 박완순, 이철형 (2008). "강우상태에 의한 소수력발전소 설계인자의 영향". **한국태양에너지학회논문집**, 한국태양에너지학회, 제28권, 제1호, pp. 43-49.
- 박완순, 이철형, 심명필 (1997). "국내 소수력발전입지의 개발타당성 분석". **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제17권, 제II-3호, pp. 197-205.
- 이충성, 김길호, 이진희, 심명필 (2007). "지형공간정보체계를 활용한 소수력개발의 입지분석". **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제12호, pp. 985-994.
- 차종희, 박인용 (1982). "소수력발전의 설계에 관한 연구". **대한전기협회지**, 대한전기협회, 조사연구논문.
- 한국에너지기술연구소 (1992). **소수력자원의 정밀조사 및 최적개발분석 연구**, KE-92029G, pp. 266-270.
- 한국에너지기술연구소 (1997). **소수력발전소 건설 타당성조사 기본계획 연구**.
- Lee, C.H., Park, W.S. (1992). "A study on the optimum design flowrate for diversion type small hydro power plant with tunnels". *Regional Center for Small Hydro Power, China*, No. 4, pp. 20-30.
- Noyes, R. (1980). *Small and micro hydro electric power plants*. Noyes Data Corporation, U.S.A.
- Park, W.S., Lee, C.H., and Jeong, S.M. (2001). "An analysis of performance characteristics for small hydro power plants". *Korea Water Resources Association*, Vol. 2, No 1.

논문번호: 09-120	접수: 2009.10.19
수정일자: 2010.01.20/03.10	심사완료: 2010.03.10