

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 3, 2007

소수력발전입지의 수문학적 성능특성

박완순*, 이철형*

*한국에너지기술연구원(pwsn@kier.re.kr, lchg@kier.re.kr)

Hydrologic Performance Characteristics of Small Scale Hydro Power Site

Park, Wan-Soon*, Lee, Chul-Hyung*

*Korea Institute of Energy Research(pwsn@kier.re.kr, lchg@kier.re.kr)

Abstract

The model to predict flow duration characteristics and performance for small scale hydro power(SSHP) plants is studied to analyze the effects of rainfall condition. One existing SSHP plant was selected and performance characteristics was analyzed by using the developed model. The predicted results from the model developed show that the data were in good agreement with operational results of existing SSHP plant. The results show that both the scale parameter and the shape parameter have large effects on the performance of SSHP sites. And also it was found that the model developed in this study can be a useful tool to predict the performance of SSHP sites.

Keywords : 소수력(Small scale hydro power), 유량지속곡선(Flow duration curve), 설계유량(Design flowrate), 가동율(Operational rate), 수문학적 성능(Hydrologic performance)

기호 설명

 A : 유역면적(km²) $D(Q)$: 유량지속함수 g : 중력가속도(m/sec²) H : 낙차(m) H_e : 유효낙차(m) k : 유출계수 L_f : 소수력발전소의 가동율(%) P : 출력(kW) P_i : 이상적인 소수력에너지(kW) P_a : 단위시간당 출력량(kWh) P_1 : 부분출력량(kWh) P_2 : 정격출력량(kWh) $P(Q)$: 확률밀도함수 Q : 유량(m³/sec) Q_r : 설계유량(m³/sec) q : 단위유역면적당 환산유량(m³/sec) α : Weibull분포의 형상계수

접수일자 : 2007년 8월 1일, 심사완료일자:2007년 9월 15일

교신저자 : 이철형(lchg@kier.re.kr)

- β : Weibull분포의 척도계수(m^3/sec)
- ρ : 물의 밀도(kg/m^3)
- η : 소수력발전소의 효율

$$D(Q) = A \exp[-(q/\beta)^\alpha] \quad (1)$$

소수력발전소에서 얻을 수 있는 순수한 에너지는 다음과 같다.

1. 서론

소수력자원은 에너지 밀도가 매우 높기 때문에 개발할 가치가 큰 부존자원으로 평가되고 있다.⁽¹⁾ 소수력발전의 경제성은 개발입지의 특성, 개발형식, 설비용량 등에 따라 큰 영향을 받는다. 효과적인 소수력발전소를 개발하기 위해서는 이들 영향인자들에 대한 정확한 분석이 수행되어야 한다.⁽²⁾⁽³⁾

대부분의 소수력발전입지는 하천의 상류에 위치하고 있으며, 유량에 관한 실측자료가 부족하다. 소수력발전입지에서의 사용유량을 결정하는 최선의 방법은 해당 지점에서 장기간에 걸친 유량을 측정, 분석하여 사용유량을 결정하는 것이다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾

그러나 이러한 방법은 장기간에 걸친 작업을 요하므로 인원 및 장비에 따른 경제적인 문제가 따른다. 이와 같은 제한점을 해결하기 위하여 수문학적인 계측자료가 없는 우리나라의 소수력발전입지에 대한 수문학적 특성을 분석하기 위한 해석방법은 오랜 기간동안 지속적으로 연구되었다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾

본 연구는 미계측 하천에 위치한 소수력발전입지의 수문학적 특성을 분석할 수 있는 성능예측모델을 이용하여 소수력발전입지의 수문학적 성능특성에 미치는 영향을 분석한 것으로, 소수력발전입지의 수문학적 성능특성은 해당구역의 유출특성과 강우상태에 따라 민감하게 변하는 것으로 밝혀졌다.

2. 소수력발전입지의 성능예측기법

소수력발전입지에서의 유량지속특성을 나타내는 유량지속함수는 Weibull분포를 이용하여 다음과 같이 구해진다.⁽⁸⁾

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

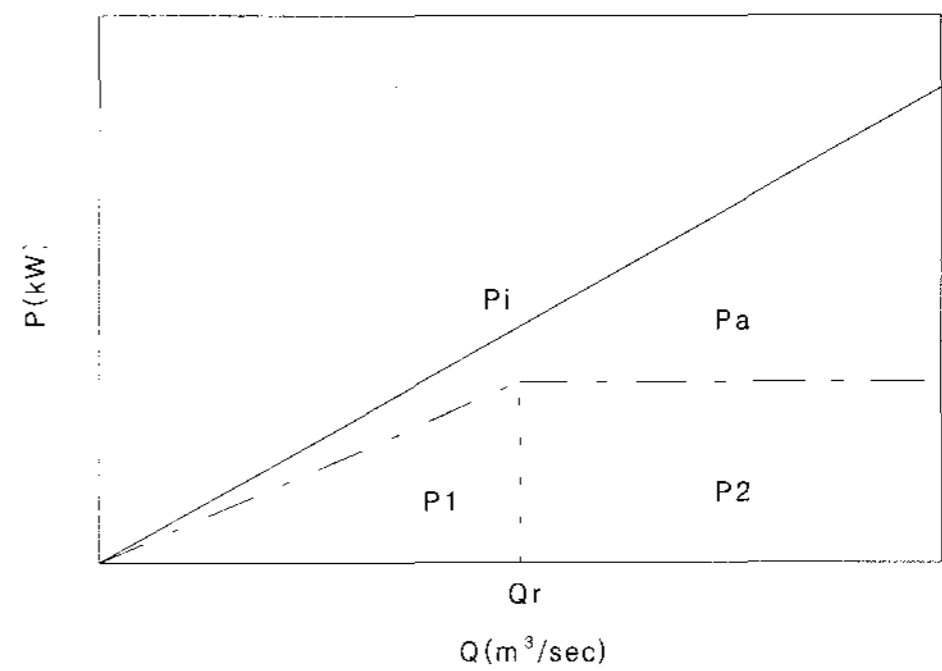


그림 1. 소수력발전소의 출력특성

소수력발전소는 월류댐을 사용하기 때문에 설계유량이하의 유량이 유입될 경우에는 모두 에너지로 변환할 수 있으나, 설계유량 이상의 유량이 유입될 경우에는 설계유량에 해당되는 유량만을 사용하고 초과유량은 월류댐 상단을 통하여 방류하게 된다. 그림 1은 낙차가 일정한 경우, 유량변화에 따른 소수력발전소의 출력의 변화를 나타내는 것으로, 월류댐을 갖는 소수력발전소의 특성을 나타내는 그림이다.

소수력발전소로 유입되는 유량은 항상 변하기 때문에 소수력발전소에서 생산되는 에너지는 쉽게 구할 수 없다. Weibull 분포를 이용하여 소수력발전소에서 얻을 수 있는 단위시간당 출력량을 해석적으로 구하면 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned}
 P_a &= \rho g H_e \eta \left[\int_0^{Q_r} P(Q) Q dQ + Q_r \int_{Q_r}^{\infty} P(Q) dQ \right] \\
 &= \rho g H_e \eta (S_1 + S_2) \\
 &= P_1 + P_2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

소수력발전소의 가동율은 다음과 같다.

$$L_f = (S_1 + S_2) / Q_r \quad (4)$$

3. 성능예측기법의 효용성 검토

소수력발전입지의 수문학적 성능특성의 변화를 고찰하기에 앞서, 개발된 성능예측모델의 효용성을 검토하기 위하여 장기간 운영되고 있는 기존 소수력발전소를 대상으로 가동율을 비교하였다. 선정된 기존 소수력발전소는 낙동강수계에 위치하며, 설계 유량은 17.8m³/sec, 유효낙차는 13.6m, 설비용량은 2,000kW이다.

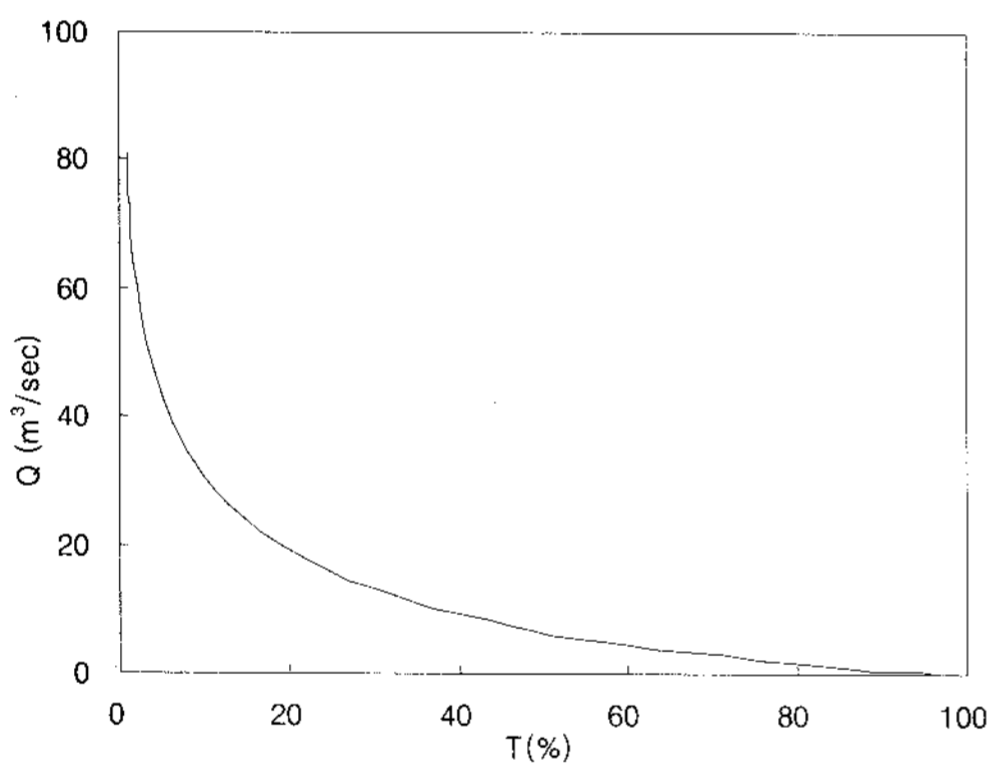


그림 2. 기존 소수력발전소의 유량지속특성

그림 2는 기존 소수력발전소에서의 유량지속특성을 예측한 것으로, 기존 소수력발전소는 유량지속곡선상의 시간비가 21.9%에 해당하는 유량을 설계유량으로 선정하여 설계하였음을 알 수 있다.

그림 3은 기존 소수력발전소의 연도별가동율과 모델을 통하여 예측한 가동율을 비교한 것이다. 예측한 가동율은 장기에측으로 연도변화에 관계없이 일정한 값을 가지므로 실제 연간가동율과는 차이가 있는 것으로 나타나지만, 연도별가동율의 평균값과는 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

기존 소수력발전소의 가동율은 1989년부터 17년간 운영하면서 한국전력공사에 판매한 전력량을

수집, 분석하여 얻은 자료로써, 17년간 가동율의 평균값은 41.8%로 분석되었다. 반면에 성능예측 모델을 이용하여 장기예측한 가동율은 44%로 절대값으로 2.2% 높게 예측되었다. 이러한 차이는 소수력발전입지를 대상으로 소수력발전소를 설계할 경우, 매우 근소한 차이로 성능을 예측한 것으로 판단되며, 그림 3은 본 연구에서 사용한 성능예측모델이 소수력발전소의 장기적인 성능을 분석하고, 소수력발전소의 초기설계제원을 산정하는데 유용하게 사용할 수 있다는 것을 제시하였다.

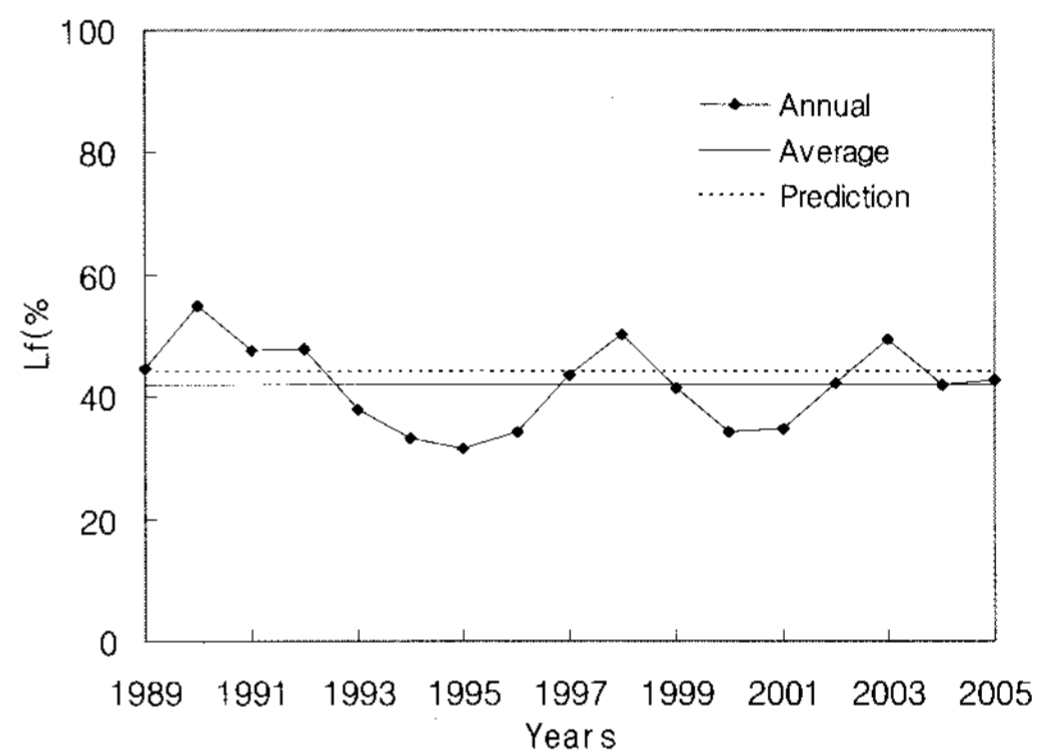


그림 3. 기존 소수력발전소의 가동율 비교

4. 강우상태에 따른 성능특성변화

소수력발전입지의 성능에 영향을 주는 인자로는 유출계수, Weibull분포의 형상계수 및 척도계수 등을 들 수 있으며, 이들 인자들은 수계의 지형학적 특성 및 강우형태에 의하여 결정되는 값으로 소수력발전소의 수문학적 성능특성에 많은 영향을 미친다. 이들 인자들의 영향을 검토하기 위하여 평창강유역의 소수력발전입지를 대상으로 선정하였다.

유출계수는 소수력발전입지의 유역면적내에서 발생한 강우량이 소수력발전입지를 통과하는 유량으로 변환되는 비율을 나타내는 계수로써 강우상태보다는 해당유역면적의 지형적인 상태 등에 영

향을 크게 받는 것으로 알려져 있다. 소수력발전소를 연구하기 시작한 초기단계에는 유출계수의 값을 0.7로 가정하였으나,⁽¹⁰⁾ 최근에는 이 값이 수계별로 0.49에서 0.57사이의 값을 가지며, 우리나라 전체의 평균값은 0.55정도가 된다는 결과가 발표되었다.⁽¹¹⁾

그림 4는 강우상태가 동일한 경우, 유출계수 변화에 따른 유량지속곡선의 변화를 나타내는 것으로 유출계수의 변화범위는 0.7에서 0.5사이로 하였다. 그림 4에서 유량지속곡선의 형태는 유출계수가 클수록 동일한 시간비에서의 유량이 크게 표시된다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 동일한 강우상태라도 유출계수가 클수록 강우량이 유량으로 많이 변하기 때문에 발생하는 것이다.

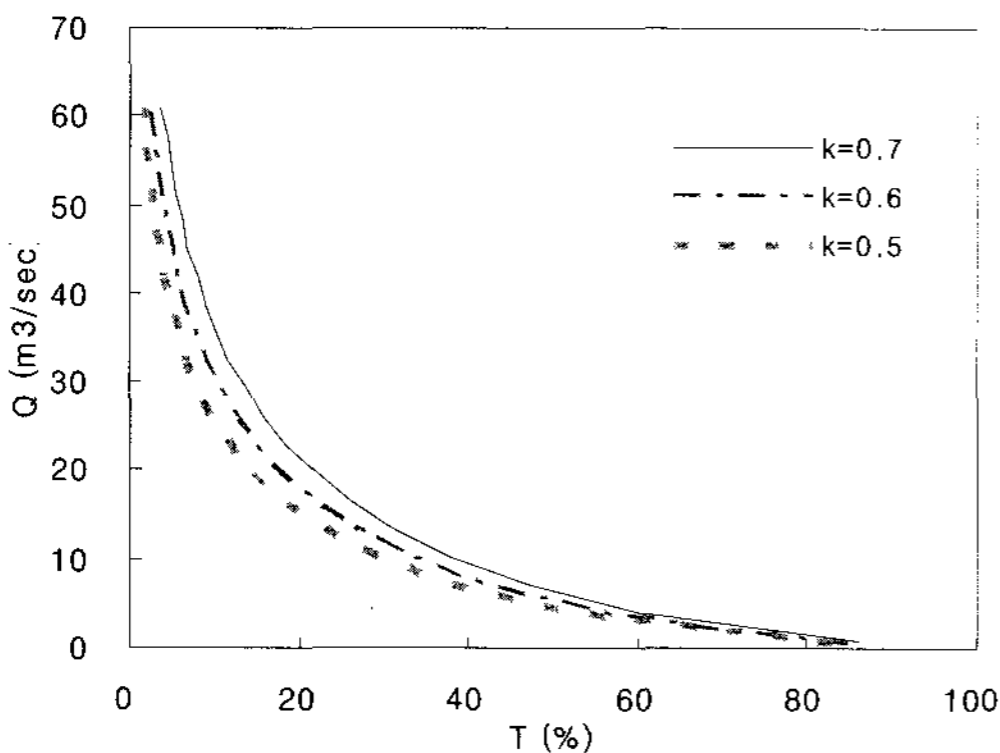


그림 4. 유출계수에 따른 유량지속특성의 변화

그림 5는 유출계수 변화에 따른 정격출력량의 변화를 보여준다. 정격출력량의 값은 유출계수가 증가할수록 증가하며, 일반적으로 소수력발전입지의 설계유량은 정격출력량이 최대가 되는 유량으로 선정하는데 유출계수가 증가할수록 설계유량이 커지고, 정격출력량의 값도 증가하게 된다.

정격출력량이 최대가 되는 설계유량은 k=0.7일 경우 18.0m³/sec, k=0.6일 경우 16.0m³/sec, k=0.5일 경우 14.0m³/sec으로 유출계수가 감소할수록 감소한다. 또한 이에 해당하는 정격출력량

의 최대값도 33.6kWh, 32.8kWh, 24.0kWh로 감소하는 것으로 나타났다.

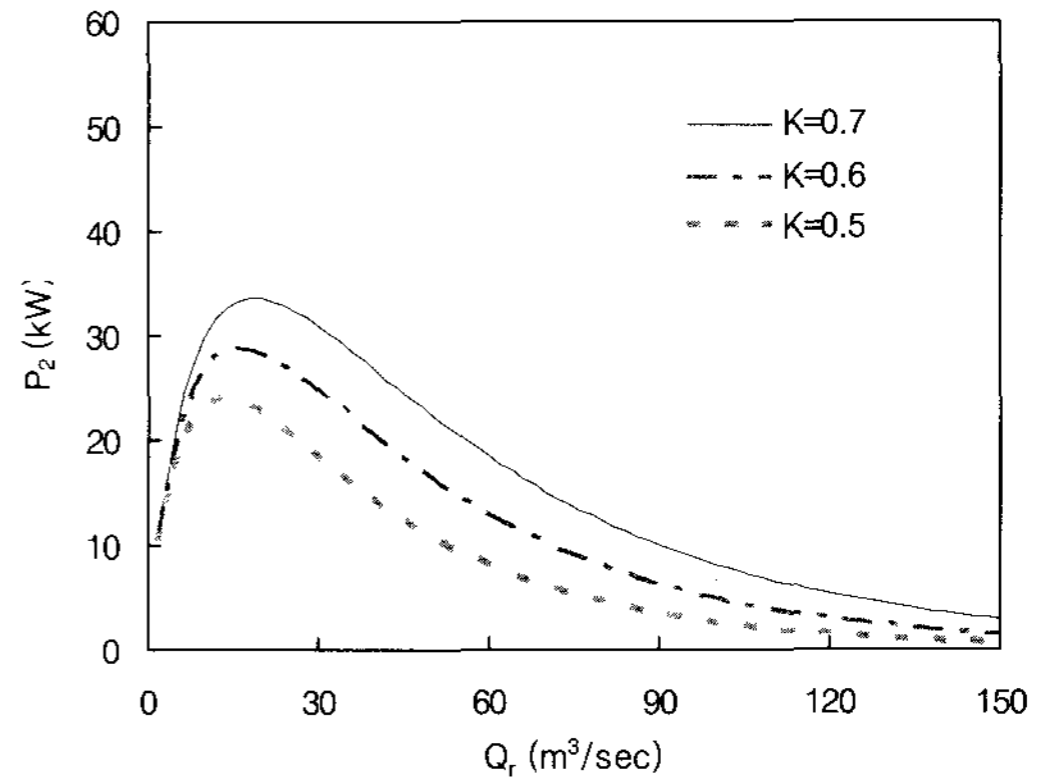


그림 5. 유출계수에 따른 정격출력의 변화

그림 6은 유출계수 변화에 따른 가동율의 변화를 나타내는 그림이다. 유출계수가 클수록 동일한 유량을 설계유량으로 선정할 경우, 가동율이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 정격출력량이 최대가 되는 설계유량에서는 k=0.7일 경우 가동율이 44.8%, k=0.6일 경우 44.9%, k=0.5일 경우 44.8%로 유출계수변화에 관계없이 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다.

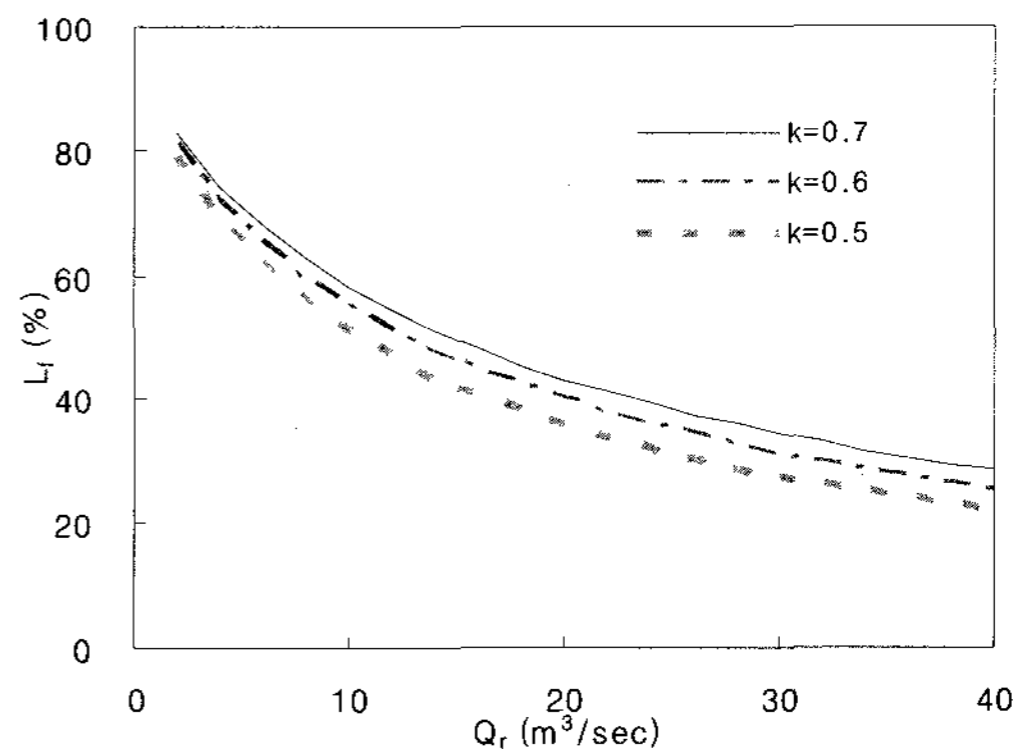


그림 6. 유출계수에 따른 가동율의 변화

그림 5와 그림 6의 결과를 연관하여 살펴보면,

유출계수가 증가할수록 설계유량과 정격출력량의 값은 증가하지만 가동율은 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 동일한 강우상태를 갖더라도 유출특성이 다르면 유량지속특성이 변한다는 것을 나타내며, 이로 인하여 소수력발전입지의 설계유량과 설비용량 등의 수문학적 성능특성이 변할 수 있다는 것을 보여준다.

그림 7은 유출계수와 척도계수가 일정한 경우, 형상계수 변화에 따른 유량지속곡선의 변화를 나타내는 것으로 형상계수가 작을수록 동일한 시간비에서의 유량이 증가하는 것을 알 수 있다.

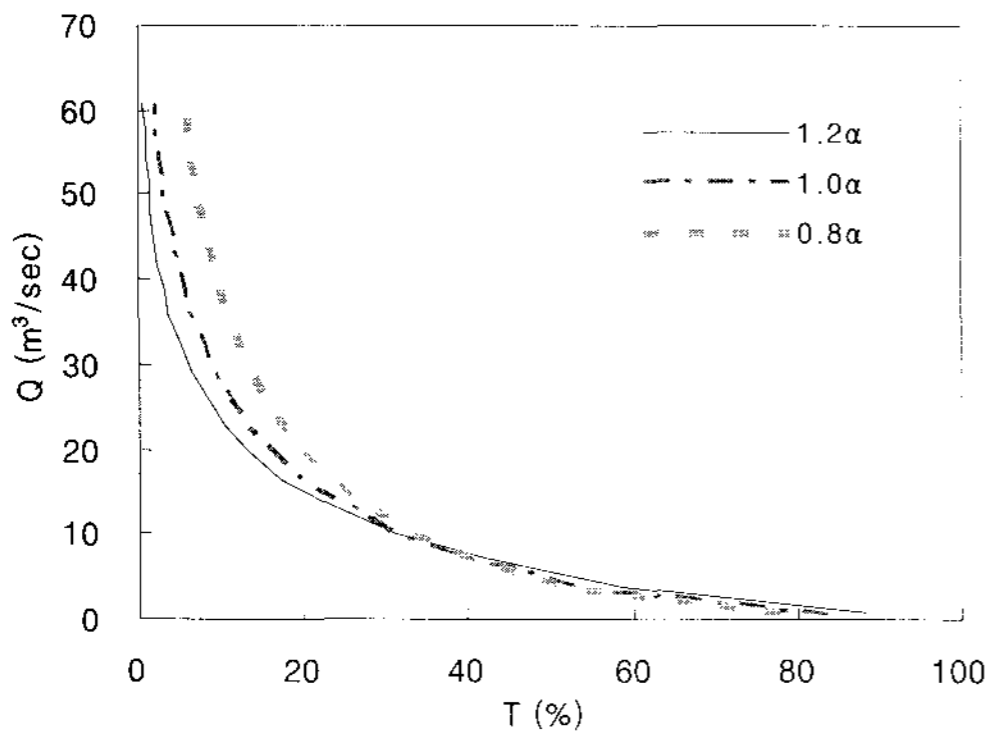


그림 7. 형상계수에 따른 유량지속특성의 변화

그림 8은 유출계수와 척도계수가 일정한 경우, 형상계수 변화에 따른 정격출력량의 변화를 보여주는 것으로, 형상계수가 증가할수록 정격출력량의 값이 감소하며, 이에 따른 설계유량의 값도 작아진다. 정격출력량이 최대가 되는 설계유량은 1.2α일 경우 14.0m³/sec, 1.0α일 경우 19.5m³/sec, 0.8α일 경우 34.5m³/sec으로 형상계수가 감소할수록 증가하는 것으로 나타났다. 또한 이에 해당하는 정격출력량의 최대값은 31.3kWh, 33.9kWh, 41.3kWh로 증가한다.

형상계수는 하천의 강우패턴과 매우 밀접한 관계를 갖는 값이기 때문에 척도계수의 변화가 없이 단지 형상계수만 변화한다는 것은 연간강우량은

같지만 강우집중도가 변한다는 것을 의미한다. 형상계수가 클수록 강우집중도가 증가하고, 형상계수가 작을수록 강우집중도가 감소된다는 것을 나타낸다. 형상계수의 증가는 하천의 연평균유량 등의 장기적인 변화가 없이 특정한 범위의 유량이 나타나는 빈도가 크다는 것을 나타낸다.

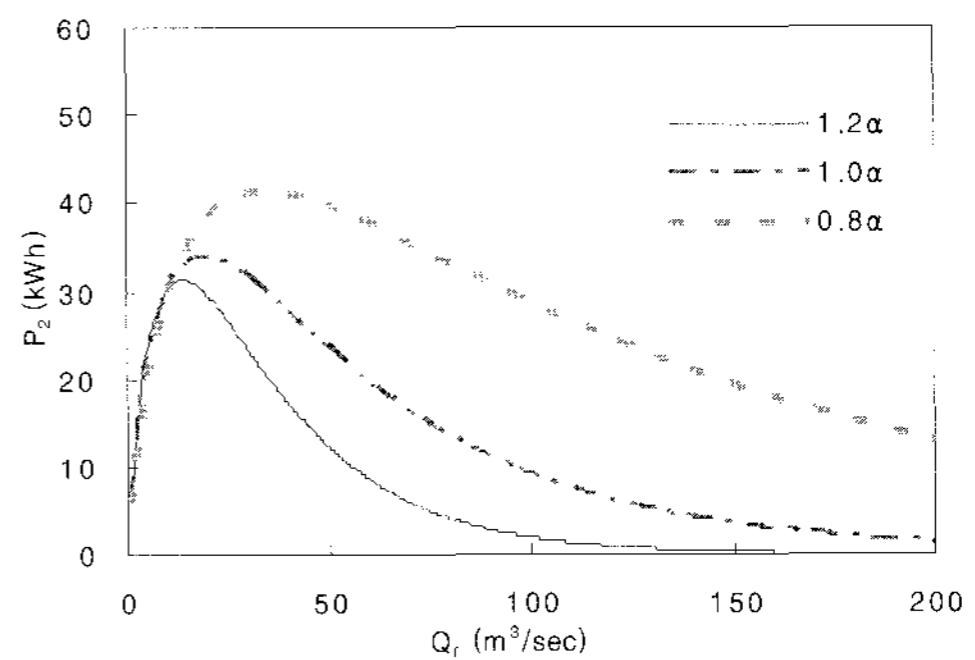


그림 8. 형상계수에 따른 정격출력의 변화

그림 9는 유출계수와 척도계수가 일정한 경우, 형상계수 변화에 따른 가동율의 변화를 나타내는 그림이다. 형상계수가 클수록 동일한 유량을 설계유량으로 선정할 경우, 가동율이 증가하는 것을 알 수 있다. 정격출력량이 최대가 되는 설계유량에서는 1.2α일 경우 52.8%, 1.0α일 경우 43.8%, 0.8α일 경우 32.7%로 형상계수가 감소할수록 가동율은 감소하는 것으로 나타났다.

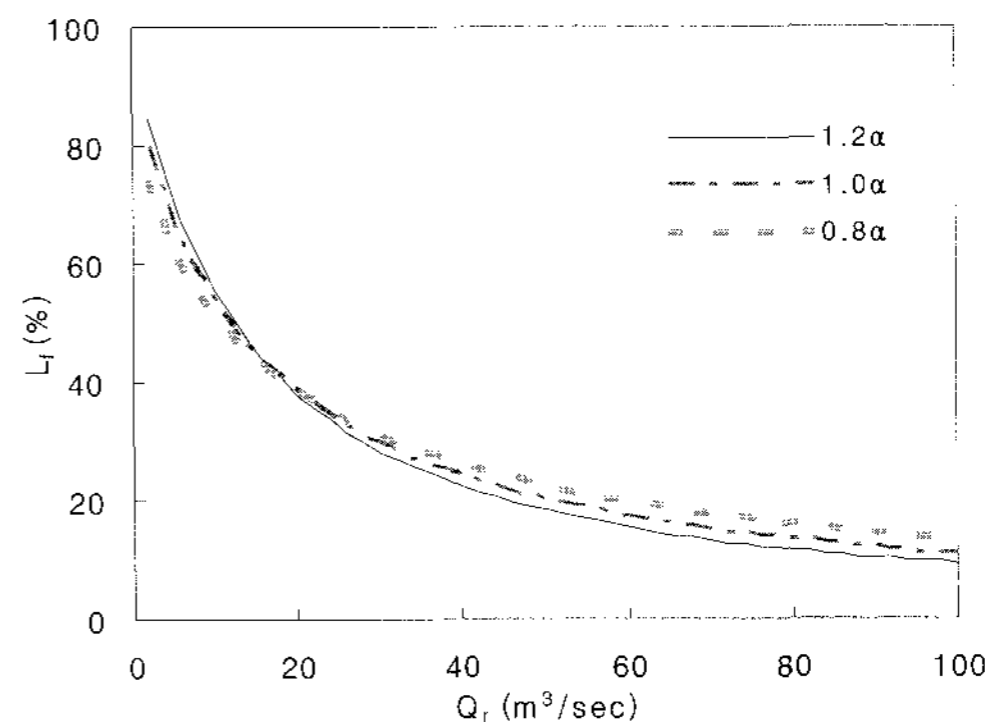


그림 9. 형상계수에 따른 가동율의 변화

그림 8과 그림 9를 통하여 유출계수와 척도계수가 일정한 경우, 형상계수가 -20%에서 +20%로 변하는 동안, 설계유량은 +76.9%에서 -28.2%로, 정격출력량은 +21.8%에서 -7.7%, 가동율은 -25.3%에서 +20.5%의 변화를 가져오는 것으로 나타나 형상계수의 변화율에 비해 모든 변수들의 값이 큰 폭으로 변하는 것으로 나타났다.

그림 10은 유출계수와 형상계수가 일정한 경우, 척도계수 변화에 따른 유량지속곡선의 변화를 나타내는 것으로 척도계수가 클수록 동일한 시간비에서의 유량이 증가하는 것을 알 수 있다.

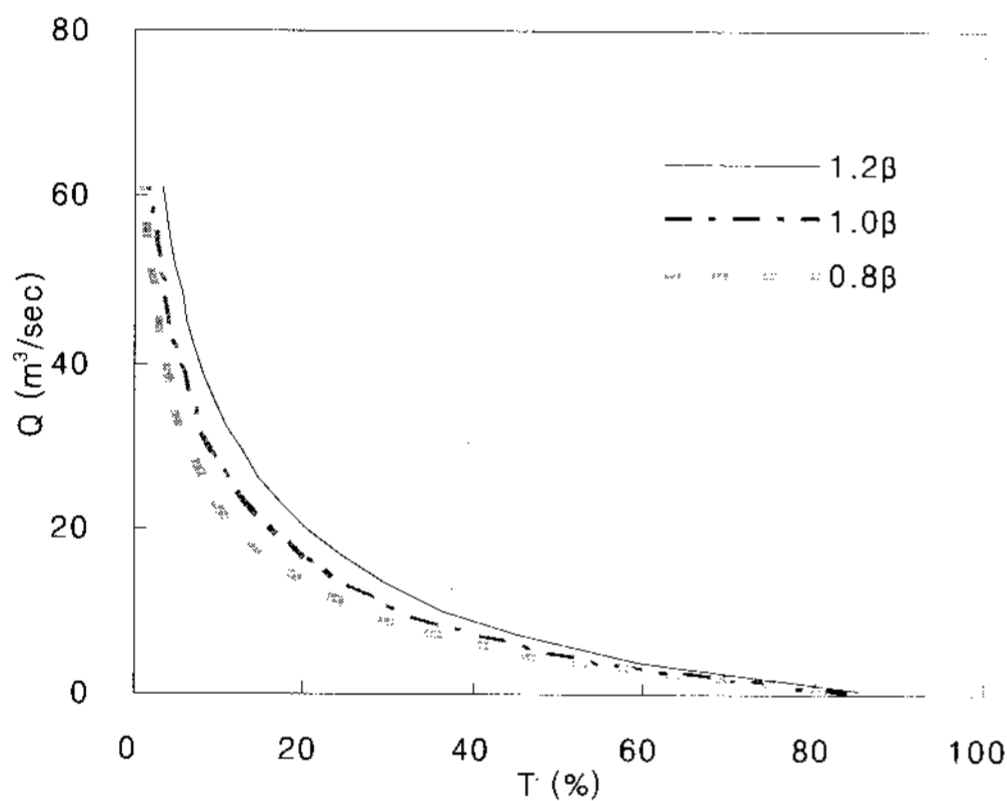


그림 10. 척도계수에 따른 유량지속특성의 변화

그림 11은 유출계수와 형상계수가 일정한 경우, 척도계수 변화에 따른 정격출력량의 변화를 보여준다. 정격출력량의 값은 척도계수가 증가할수록 증가한다. 정격출력량이 최대가 되는 설계유량은 1.2β일 경우 23.4m³/sec, 1.0β일 경우 19.5m³/sec, 0.8β일 경우 15.6m³/sec으로 척도계수가 감소할수록 감소한다. 또한 이에 해당하는 정격출력량의 최대값도 40.7kWh, 33.9kWh, 27.1kWh로 감소하는 것으로 나타났다.

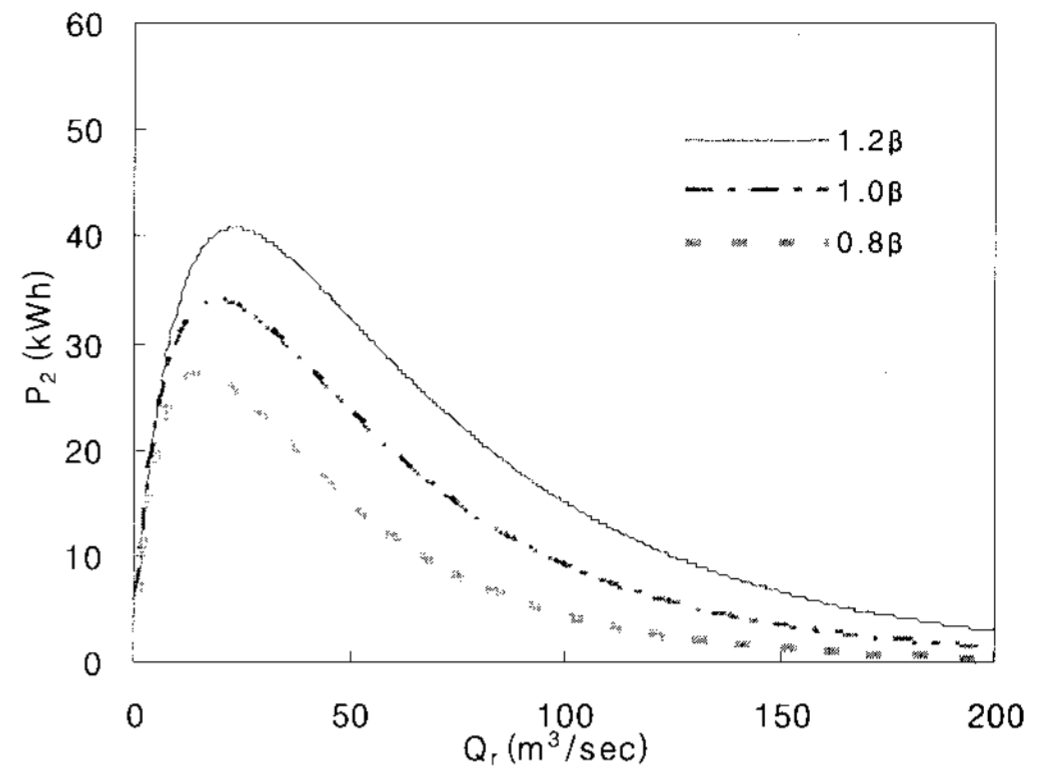


그림 11. 척도계수에 따른 정격출력의 변화

그림 12는 유출계수와 형상계수가 일정한 경우, 척도계수 변화에 따른 가동율의 변화를 나타내는 그림이다. 정격출력량이 최대가 되는 설계유량에서 가동율은 1.2β일 경우 43.8%, 1.0β일 경우 43.8%, 0.8β일 경우 43.8%로 산정되어 척도계수의 변화에 관계없이 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다.

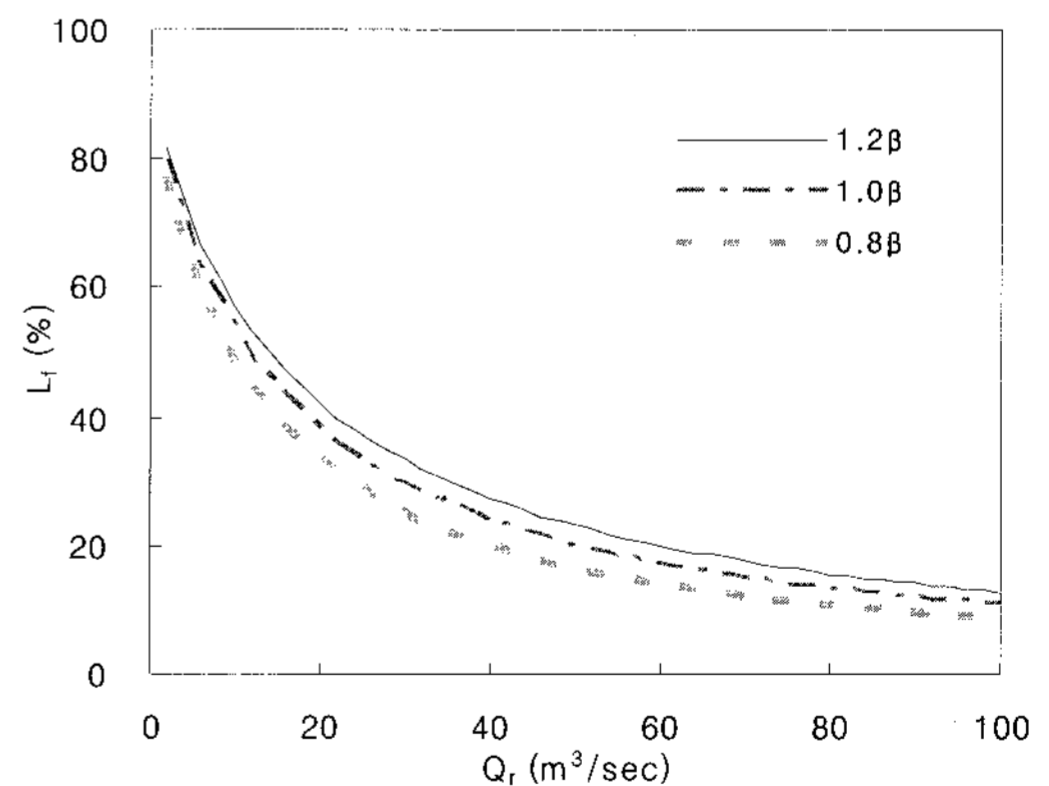


그림 12. 척도계수에 따른 가동율의 변화

그림 11과 그림 12를 통하여 유출계수와 형상계수가 일정한 경우, 척도계수가 -20%에서 +20%로 변하는 동안, 설계유량은 -20.0%에서 20.0%로, 정격출력량은 -20.0%에서 +20.0%의 변화

를 가져와 척도계수의 변화율과 모든 변수들의 값이 선형적으로 변하고, 가동율은 변화가 없는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 통하여 소수력발전입지가 속해 있는 수계에 따라 강우상태와는 직접 관계가 없지만 유출계수가 수문학적 성능특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 유출계수가 동일하더라도 강우상태의 변화는 소수력발전입지의 수문학적 특성변화에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 특히 강우집중도에 관계되는 형상계수의 변화가 강우량에 관계되는 척도계수의 변화보다 민감하게 영향을 미치기 때문에 소수력발전소의 설계시 세심한 분석이 요구된다.

5. 결론

미계측 하천에 위치하여 수문자료가 부족한 소수력발전입지에 대한 수문학적 특성과 성능을 예측할 수 있는 모델을 구축하였고, 모델을 이용하여 유출상태 및 강우상태가 소수력발전입지의 수문학적 성능특성에 미치는 영향을 분석하였다.

형상계수와 척도계수가 $\pm 20\%$ 변하는 동안, 형상계수 변화의 경우, 설계유량은 $+76.9\%$ 에서 -28.2% 로, 정격출력량은 $+21.8\%$ 에서 -7.7% , 가동율은 -25.3% 에서 $+20.5\%$ 의 변화를 가져오는 것으로 나타났다. 반면에 척도계수변화의 경우, 설계유량과 정격출력량이 $\pm 20\%$ 의 변화를 가져오고, 가동율은 변화가 없는 것으로 나타났다.

형상계수의 변화는 소수력발전소 설계변수들의 값을 비선형적으로 크게 변화시키는 것으로 나타났으며, 척도계수의 변화는 여러 변수들의 값을 선형적으로 변화시키며, 가동율은 변화가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 강우집중도에 관계되는 형상계수의 변화가 강우량에 관계되는 척도계수의 변화보다 소수력발전소의 설계시 민감하게 분석되어야 하는 것을 나타낸다.

또한 강우상태와는 직접 관계가 없지만, 유출계

수의 변화는 척도계수의 변화와 유사하게 수문학적 성능특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Crawford, H. N. and Thurin, M.S., Hydrologic Estimates for Small Hydroelectric Projects, NRECA, Washington, USA, 1981.
2. 이철형 외, 소수력자원의 정밀조사 및 최적개발분석 연구, 한국에너지기술연구소, 연구보고서, 1992.
3. 이철형 외, 소수력발전소 건설 타당성조사 기본계획 연구, 한국에너지기술연구소, 연구보고서, 1997.
4. Robert Noyes, Small and Micro Hydro Electric Power Plants; Technology and Feasibility, Energy Technology Review No.60, Noyes Data Corporation, U.S.A., 1980.
5. 石崎彰, 古市正敏, 小水力發電 讀本, オ-ム社, 1981.
6. Lee, C. H., Park, W. S., "A Study on the Optimum Design Flowrate for Diversion Type Small Hydro Power Plant with Tunnels", SHP News, No.4, pp.20-30, Hangzhou Regional Center for Small Hydro Power, China, 1992.
7. 박완순, 이철형, 심명필, "국내 소수력발전입지의 개발타당성 분석", 대한토목학회논문집, 제 17권, 제II-3호, 1997.
8. Park, W. S., Lee, C. H., and Jeong, S. M., "An Analysis of Performance Characteristics for Small Hydro Power Plants", KWRA, Vol.2, No1, 2001.
9. 박완순, 이철형, "소수력발전소의 성능예측기법에 관한 연구", 한국수자원학회, 춘계학술대

- 회, 2003.
10. 차종희 외, “소수력발전의 설계에 관한 연구”, 대한전기협회, 조사연구논문, 1982.
11. 김승, 우리나라 수자원 정책의 문제점과 대안, 물위기 시대 우리나라 수자원 정책, 환경정책 시민연대, 2000.