

# 강우상태에 의한 소수력발전소 성능변수의 변화

박완순\*, 이철형\*\*

## The Variations of Performance Parameters for Small Scale Hydro Power Plant with Rainfall Condition

Wansoon Park\* and Chulhyung Lee\*\*

### Abstract

The effects of design parameters for small scale hydro power (SSHP) plants due to rainfall condition have been studied. The model to predict hydrologic performance for SSHP plants is used in this study. The results from analysis for rainfall conditions based on Weibull distribution show that the capacity and load factor of SSHP site had large difference between the variation of shape and scale parameter. Especially, the hydrologic performance of SSHP site due to variation of shape parameter varied more sensitive than the case of variation of scale parameter. And also, the methodology represented in this study can be used to decide the primary design specifications of SSHP sites.

### Key words

Small scale hydro power(소수력), Diversion dam(월류댐), Design parameter(설계변수), Design flowrate(설계유량), Rainfall condition(강우상태)

(접수일 2008. 5. 29, 수정일 2008. 7. 8, 게재확정일 2008. 7. 18)

\* 한국에너지기술연구원

E-mail : pwsn@kier.re.kr Tel : (042)860-3432 Fax : (042)860-3739

\*\* 한국에너지기술연구원

E-mail : lchg@kier.re.kr Tel : (042)860-3437 Fax : (042)860-3739

## Nomenclature

$A$  : basin area,  $km^2$

$C$  : capacity,  $kW$

$D(Q)$  : flow duration function

$E_a$  : annual energy production,  $MWh$

$F(q)$  : cumulative distribution function for unit basin area

$F(Q)$  : cumulative distribution function

$g$  : gravitational acceleration,  $m/s^2$

$H$  : head,  $m$

$k$  : discharge coefficient

$L_f$  : load factor of small hydropower plants, %

$P$  : power,  $kW$

- $P_a$  : output of unit time, kWh
- $P_i$  : ideal power, kW
- $P_{ia}$  : ideal output, kWh
- $P_1$  : partial output, kWh
- $P_2$  : rated output, kWh
- $P(q)$  : probability density function for unit basin area
- $P(Q)$  : probability density function
- $q$  : monthly mean flowrate for unit basin area,  $m^3/s$
- $Q$  : flowrate,  $m^3/s$
- $Q_a$  : annual mean flowrate,  $m^3/s$
- $Q_m$  : monthly mean flowrate,  $m^3/s$
- $Q_r$  : design flowrate,  $m^3/s$
- $R_t$  : annual rainfall amount, mm
- $R_m$  : monthly rainfall amount, mm
- $T$  : time ratio, %
- $U_f$  : utility factor of small hydropower, %
- $\alpha$  : shape parameter of Weibull distribution
- $\Delta\alpha$  : increment of shape parameter
- $\alpha_R$  : ratio of shape parameter(= $1\pm\Delta\alpha$ )
- $\beta$  : scale parameter of Weibull distribution,  $m^3/s$
- $\Delta\beta$  : increment of scale parameter
- $\beta_R$  : ratio of scale parameter(= $1\pm\Delta\beta$ )
- $\rho$  : density of water,  $kg/m^3$
- $\eta$  : efficiency of small hydropower plant

## 1. 서론

소수력자원은 신재생에너지 중에서도 온실가스 배출량이 가장 적고 에너지밀도가 매우 높기 때문에 개발할 가치가 큰 청정부존자원으로 평가되고 있다. 특히, 우리나라에서 소수력발전은 화석연료의 감축노력과 풍부한 부존량을 바탕으로 대체에너지로서 성장잠재력이 클 것으로 전망된다. 소수력발전소 개발의 성공은 사업시행을 판가름할 경제성분석에 의해 좌우되는데, 이는 개발형식 및 설비용량과 같은 발전성능 특성에 의해 결정된다.<sup>(1,2)</sup> 그런데 발전성능 특성은 지형조건, 수문조건 및 환경·생태조건 등에 의해 결정되므로 정확한 입

지분석은 소수력발전소 개발의 핵심적 과제라 할 수 있다.<sup>(3,4)</sup> 따라서 소수력발전소를 효과적으로 개발하기 위해서는 이들 영향인자들에 대한 정확한 분석이 수행되어야 한다.

대부분의 소수력발전소는 하천의 상류에 위치하고 있으며, 유량에 관한 실측자료가 부족하다. 소수력발전소에서의 사용 유량을 결정하는 최선의 방법은 해당 지점에서 장기간에 걸친 유량을 측정, 분석하여 사용유량을 결정하는 것이다.<sup>(5,6)</sup> 그러나 이러한 방법은 장기간에 걸친 측정을 요하므로 인원 및 장비에 따른 경제적인 문제가 따른다. 이와 같은 제한점을 해결하기 위하여 계측자료가 없는 우리나라의 소수력발전소에 대한 수문학적 특성을 분석하기 위한 해석방법이 연구되어 왔다.<sup>(7-9)</sup>

본 연구는 강우상태가 소수력발전소의 수문학적 성능특성에 미치는 영향을 분석한 것으로, 성능특성은 수문자료가 없는 소수력발전소의 성능특성을 예측할 수 있는 분석모델을 이용하였다.<sup>(10)</sup> 본 연구를 위하여 강우상태를 표시할 수 있는 분포함수가 사용되었으며, 도출된 결과는 강우상태변화에 따른 제반 특성변화를 효과적으로 표현하였다.

## 2. 하천의 유량지속특성 분석모델

우리나라의 경우 대부분의 소수력발전소는 하천의 상류에 위치하기 때문에 유입량 등에 대한 수문학적인 실측자료가 부족하여 소수력발전소에서의 유량지속곡선을 작성하기가 매우 어려운 실정이다. 그러나 하천의 유량은 하천이 소속되어 있는 해당 유역면적내의 강수량에 의해 결정되기 때문에 이를 분석함으로써 예측할 수 있다.

하천의 연평균유량은 해당유역의 연평균강수량과 유역면적으로부터 다음과 같이 산정된다.<sup>(11)</sup>

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

만일 유출계수 k가 연중 일정한 값을 유지한다면 하천의 월평균유량은 다음과 같이 산정된다.

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

식 (2)를 이용하여 관측소에서 측정된 월강수량자료를 단위유역면적당, 즉 유역면적 1km<sup>2</sup>당의 월평균유량 q로 환산할 수 있으며, 이를 이용하여 단위유역면적당의 유량지속곡선을 작성할 수 있다. 유량지속곡선은 유량의 크기별로 누적시킨 것으로 특정한 누가확률분포함수의 형태로 표시할 수 있다.

본 연구에서는 월간 강수량자료를 단위유역면적당의 월평균유량 자료로 환산하여 구해진 단위 유역면적당의 유량지속곡선을 Weibull분포의 누가확률분포함수를 이용하여 특성화하였다.

Weibull분포의 확률밀도함수와 누가확률분포함수는 다음과 같이 표시된다.

$$P(q) = (\alpha/\beta)(q/\beta)^{\alpha-1} \exp(-(q/\beta)^\alpha) \quad (3)$$

$$F(q) = \int_0^q P(q) dq = 1 - \exp(-(q/\beta)^\alpha) \quad (4)$$

소수력발전소를 통과하는 유량은 다음과 같이 표시된다.

$$Q = A q \quad (5)$$

따라서 소수력발전소에서의 누가확률분포함수와 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$F(Q) = A(1 - \exp(-(q/\beta)^\alpha)) \quad (6)$$

$$P(Q) = A((\alpha/\beta)(q/\beta)^{\alpha-1} \exp(-(q/\beta)^\alpha)) \quad (7)$$

또한 소수력발전소에서의 유량지속곡선을 나타내는 유량지속함수는 다음과 같이 구해진다.

$$D(Q) = 1 - F(Q) = A \exp(-(q/\beta)^\alpha) \quad (8)$$

식 (8)에서 형상모수  $\alpha$ 는 강우의 형태에 관련되는 상수이고, 척도모수  $\beta$ 는 강우량의 크기에 관련되는 상수이다.

### 3. 소수력발전소의 성능예측모델

Fig. 1은 낙차가 일정한 경우, 월류댐을 갖는 소수력발전소의 유량변화에 따른 출력성능특성을 나타내는 그림이다. 소수력발전소에서의 이상적인 출력은 다음과 같이 표시된다.

$$P_i = \rho g Q H \quad (9)$$

Weibull분포를 이용하여 소수력발전소에서 얻을 수 있는 이상적인 출력량을 구하면 다음과 같다.

$$P_{ia} = \rho g H \eta \int_0^\infty P(Q) Q dQ \quad (10)$$

소수력발전소는 월류댐을 사용하기 때문에 설계유량이하의 유량이 유입될 경우에는 모두 에너지로 변환할 수 있으나, 설계유량이하의 유량이 유입될 경우에는 설계유량에 해당되는 유량만을 사용하고 초과유량은 월류댐 상단을 통하여 방류하게 된다. 소수력발전소로 유입되는 유량은 항상 변하기 때문에 소수력발전소에서 생산되는 에너지는 쉽게 구할 수 없다. 소수력발전소에서 얻을 수 있는 단위시간당 출력량은 설계유량이하의 유량으로부터 얻을 수 있는 출력량과 설계유량 이상의 유량으로부터 얻을 수 있는 출력량으로 구분할 수 있다. Weibull 분포를 이용하여 소수력발전소에서 얻을 수 있는 단위시간당 출력량을 구하면 다음과 같다.

$$P_a = \rho g H \eta \int_0^{Q_c} P(Q) Q dQ + \rho g H Q_c \eta \int_{Q_c}^\infty P(Q) dQ = P_1 + P_2 \quad (11)$$

소수력발전소의 시설용량, 가동율과 연간출력량은 다음과 같다.

$$C = \rho g H Q_c \eta \quad (12)$$

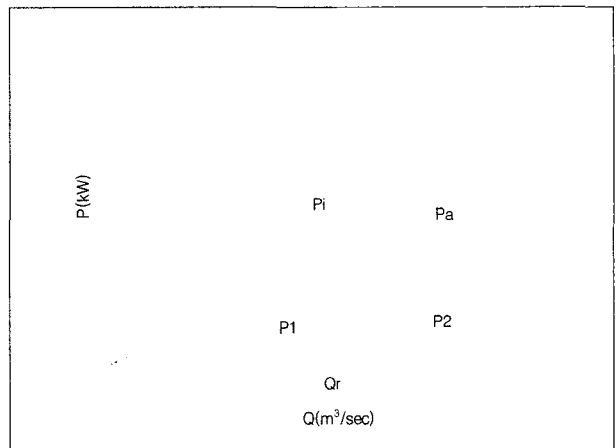


Fig. 1 Output characteristics of small hydropower plant.

$$L_f = P_a / C \quad (13)$$

$$E_a = 8,760 C L_f \quad (14)$$

또한 소수력발전소에서의 소수력에너지 이용율은 다음과 같다.

$$U_f = P_a / P_{ia} \quad (15)$$

#### 4. 소수력발전소의 성능특성변화

소수력발전소의 수문학적 성능에 영향을 주는 인자로는 해

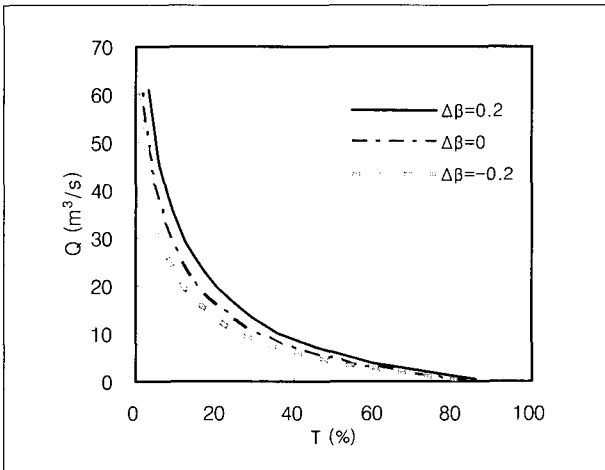


Fig. 2 Flow duration curve with the variation of scale parameter.

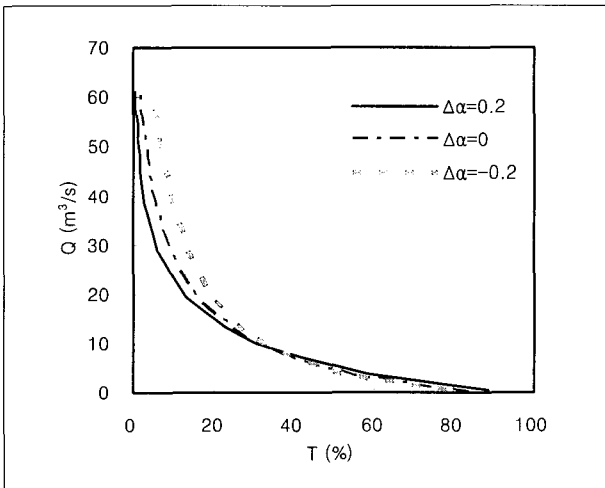


Fig. 3 Flow duration curve with the variation of shape parameter.

당유역의 강우상태에 의하여 결정되는 Weibull분포의 형상모수 및 척도모수 등을 들 수 있다. 이들 인자들의 영향을 검토하기 위하여 평창강에 위치한 소수력발전입지를 선정하여 소수력발전소로 건설할 경우, 수행되어야 하는 설계변수들의 특성을 분석하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 척도모수의 증감량과 형상모수의 증감량 변화에 따른 유량지속특성의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 척도모수의 증감량이 증가할 경우, 유량지속특성은 시간비 전구간에 걸쳐 유사한 형태로 나타난다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3에서 형상모수의 증감량이 변하는 경우에는 유량지속곡선의 형태가 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 2와 Fig. 3에서 보여준 유량지속곡선의 변화는 척도모수와 형상모수가 지니는 특성에 의한 것이다. 척도모수는 강우량의 크기에 관련되는 계수로써 이의 증가는 연간강우량과 하천 유량의 선형적인 증가로 나타난다. 반면에 형상모수의 증가는 연간강우량은 동일하고 강우의 패턴만이 바뀌는 것이기 때문에 척도모수의 증가때와는 다른 유량지속특성이 나타난다.

Fig. 4는 척도모수 변화에 따른 정격출력량의 변화를 보여 준다. 정격출력량의 값은 척도모수가 증가할수록 증가한다. 척도모수는 하천의 연평균유량과 관계되는 값이기 때문에 형상모수의 변화가 없이 단지 척도모수만 증가한다는 것은 연평균강우량의 증가에 의한 연평균유량의 증가로 나타난다. 정격출력량이 최대가 되는 설계유량은 척도모수의 증감율이  $\Delta\beta=-0.2$ 일 경우  $15.6\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta\beta=0$ 일 경우  $19.5\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta\beta=0.2$ 일 경우  $23.4\text{m}^3/\text{s}$ 로 척도모수가 증가할수록 증가한다.

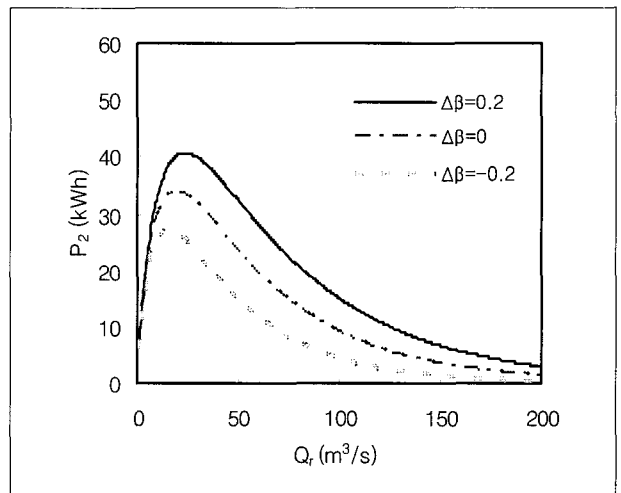


Fig. 4 Rated output with the variation of scale parameter.

Fig. 5는 형상모수 변화에 따른 정격출력량의 변화를 보여주는 것으로, 형상모수가 증가할수록 정격출력량의 값이 감소하며, 이에 따른 설계유량의 값도 작아진다. 형상모수는 하천의 강우패턴과 관계되는 값이기 때문에 척도모수의 변화가 없이 단지 형상모수만 변화한다는 것은 연간강우량은 같지만 강우의 집중도가 변한다는 것을 의미한다. 형상모수가 클수록 강우의 집중도가 증가하며, 형상모수의 증가는 하천의 연평균유량 등의 장기적인 변화가 없이 특정한 범위의 유량이 나타나는 빈도가 크다는 것을 나타낸다. 정격출력량이 최대가 되는 설계유량은 형상모수의 증감율이  $\Delta\alpha=-0.2$ 일 경우  $34.5\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta\alpha=0$ 일 경우  $19.5\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta\alpha=0.2$ 일 경우  $14.0\text{m}^3/\text{s}$

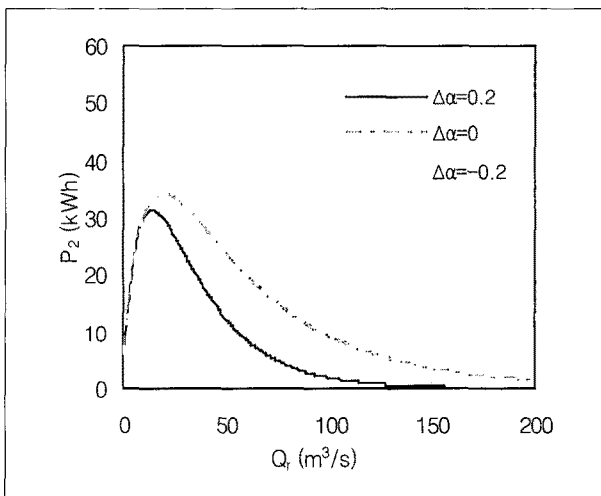


Fig. 5 Rated output with the variation of shape parameter.

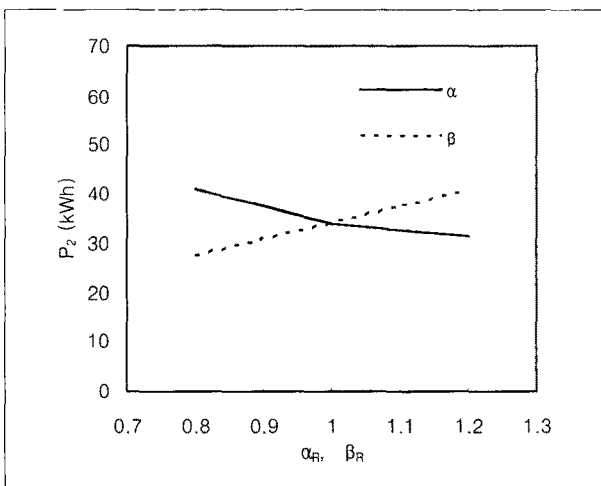


Fig. 6 Variation of rated output with the ratio of scale parameter and shape parameter.

으로 형상모수가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 형상모수의 증감율과 척도모수의 증감율 변화에 따른 정격출력량의 변화를 나타내는 것으로 Fig. 4와 Fig. 5에서 정격출력량이 최대가 되는 값을 나타낸 것이다.

정격출력량은 형상모수의 증감율이  $\Delta\alpha=-0.2$ 일 경우  $41.3\text{kWh}$ ,  $\Delta\alpha=0$ 일 경우  $33.9\text{kWh}$ ,  $\Delta\alpha=0.2$ 일 경우  $31.3\text{kWh}$ 로 형상모수가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 척도모수의 증감율이  $\Delta\beta=-0.2$ 일 경우  $27.1\text{kWh}$ ,  $\Delta\beta=0$ 일 경우  $33.9\text{kWh}$ ,  $\Delta\beta=0.2$ 일 경우  $40.7\text{kWh}$ 로 정격출력량은 척도모수가 증가할수록 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 강우형태는 동일하고 강우량만 비례적으로 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 형상모수의 변화는 연간강우량이 같아도 강우형태가 변하는 것을 표현하는 것으로, 이 값의 변화는 강우의 집중도에 관계가 있으므로 소수력발전소의 설계유량 선정에 많은 영향을 미친다.

Fig. 7은 형상모수의 증감율과 척도모수의 증감율 변화에 따른 시설용량의 변화를 나타낸다. 시설용량은 Fig. 2와 Fig. 3에서 정격출력이 최대가 되는 유량을 설계유량으로 선정하여 산정한 것이다. 시설용량은  $\Delta\alpha=-0.2$ 일 경우  $270.5\text{kW}$ ,  $\Delta\alpha=0$ 일 경우  $152.9\text{kW}$ ,  $\Delta\alpha=0.2$ 일 경우  $109.8\text{kW}$ 로 형상모수가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 이는 형상모수가  $-20\%$ 에서  $+20\%$ 로 변하는 동안, 시설용량은  $+76.9\%$ 에서  $-28.2\%$ 의 변화를 가져오는 것으로 나타났다. 반면에 시설용량은  $\Delta\beta=-0.2$ 일 경우  $121.5\text{kW}$ ,  $\Delta\beta=0$ 일 경우  $152.9\text{kW}$ ,  $\Delta\beta=0.2$

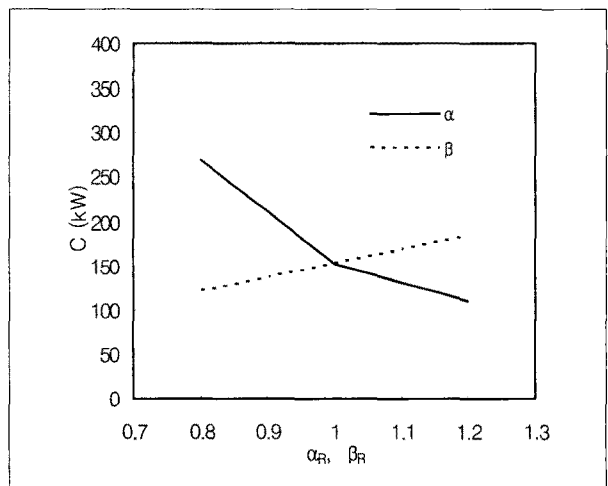


Fig. 7 Variation of capacity with the ratio of scale parameter and shape parameter.

일 경우 184.2kW로 척도모수가 증가할수록 증가한다. Fig. 5를 통하여 척도모수가 -20%에서 +20%로 변하는 동안, 시설용량은 -20.0%에서 +20.0%로, 척도모수의 변화량에 따라 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 형상모수의 증감율과 척도모수의 증감을 변화에 따른 연간출력량의 변화를 나타낸다. 연간출력량은  $\Delta\alpha=-0.2$ 일 경우 775.4MWh,  $\Delta\alpha=0$ 일 경우 587.3MWh,  $\Delta\alpha=0.2$ 일 경우 508.3MWh로 형상모수가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 이는 형상모수가 -20%에서 +20%로 변하는 동안, 연간출력량은 +32.0%에서 -13.5%의 변화를 가져오는 것으로

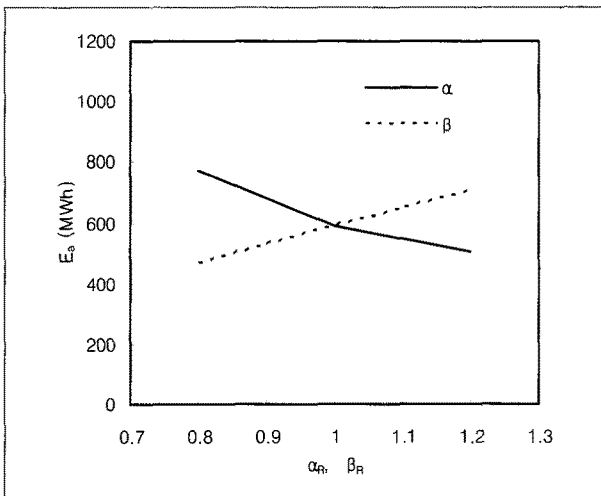


Fig. 8 Variation of annual output with the ratio of scale parameter and shape parameter.

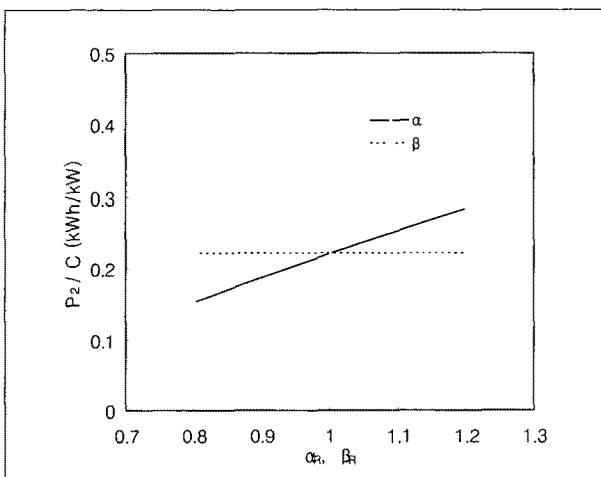


Fig. 9 Variation of  $P_2/C$  with the ratio of scale parameter and shape parameter.

나타났다. 반면에 연간출력량은  $\Delta\beta=-0.2$ 일 경우 468.3MWh,  $\Delta\beta=0$ 일 경우 587.3MWh,  $\Delta\beta=0.2$ 일 경우 706.3MWh로 척도모수가 증가할수록 증가한다. Fig. 8을 통하여 척도모수가 -20%에서 +20%로 변하는 동안, 연간출력량은 -20.0%에서 +20.0%로, 척도모수의 변화량에 따라 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 형상모수의 증감율과 척도모수의 증감을 변화에 따른 시설용량과 정격출력량비의 변화를 나타내는 것이다. 형상모수의 증감율이  $\Delta\alpha=-0.2$ 일 경우 0.153,  $\Delta\alpha=0$ 일 경우 0.222,  $\Delta\alpha=0.2$ 일 경우 0.285로 형상모수가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 형상모수가 -20%에서 +20%로 변하는 동안, -31.1%에서 +28.4%의 변화를 가져오는 것으로 나타났다. 반면에 척도모수의 증감율이 변화할 경우, 이 값은 0.222로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 형상모수의 증감율과 척도모수의 증감을 변화에 따른 가동율의 변화를 나타내는 것이다. 정격출력량이 최대가 되는 설계유량에서는  $\Delta\alpha=-0.2$ 일 경우 32.7%,  $\Delta\alpha=0$ 일 경우 43.8%,  $\Delta\alpha=0.2$ 일 경우 52.9%로 형상모수가 증가할수록 가동율은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 형상모수가 -20%에서 +20%로 변하는 동안, 가동율은 -25.3%에서 +20.5%의 변화를 가져오는 것으로 나타났다. 반면에 척도모수의 증감율이 변화할 경우, 가동율은 43.8%의 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 형상모수의 증감율과 척도모수의 증감을 변화에

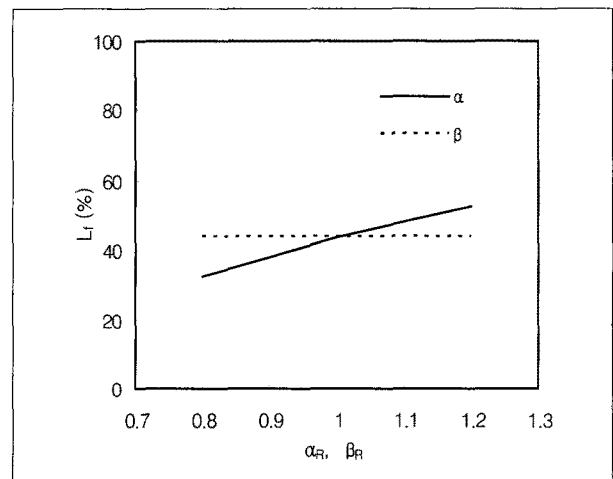


Fig. 10 Variation of load factor with the ratio of scale parameter and shape parameter.

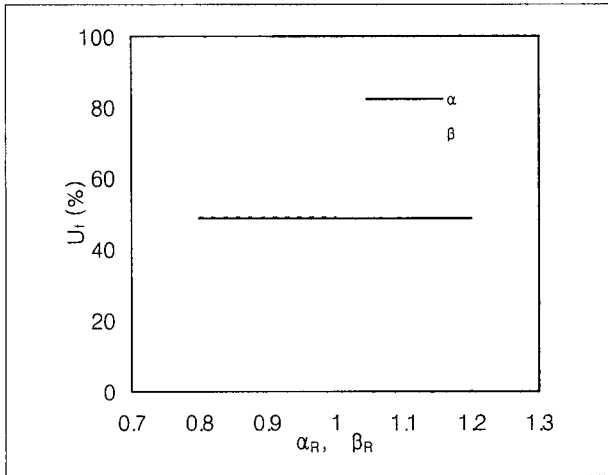


Fig. 11 Variation of utility factor with the ratio of scale parameter and shape parameter.

따른 소수력에너지 이용율의 변화를 나타내는 것이다. 소수력에너지 이용율은 48.7%로 강우상태의 변화, 즉 형상모수와 척도모수의 증감율에 관계없이 소수력발전소의 정격출력량이 최대가 되는 유량을 설계유량으로 선정할 경우, 동일한 값으로 산정된다. 이는 정격출력량이 최대로 되는 유량을 소수력발전소의 설계유량으로 선정할 경우, 주어진 소수력에너지를 효과적으로 사용할 수 있다는 것을 의미하며, 수문학적으로는 최적의 설계상태임을 나타낸다.

## 5. 결론

강우상태가 소수력발전소의 수문학적 성능특성에 미치는 영향을 분석하였다.

강우의 형태를 나타내 주는 형상모수에 의한 영향을 고찰한 결과, 형상모수가  $\pm 20\%$  변하는 동안, 시설용량은 +76.9%에서 -28.2%로, 연간출력량은 +32.0%에서 -13.5%로, 가동율은 -25.3%에서 +20.5%로 변화를 가져오는 것으로 나타났다. 반면에 강우량의 크기를 나타내 주는 척도모수가  $\pm 20\%$  변하는 경우, 시설용량과 연간출력량이  $\pm 20\%$ 의 변화를 가져오고, 가동율은 변화가 없는 것으로 나타났다.

형상모수의 변화는 척도모수의 변화에 비하여 소수력발전

소 설계변수들의 값을 보다 민감하게 변화시키는 것으로 나타났다. 척도모수의 변화는 여러 설계변수들의 값을 선형적으로 변화시키며, 가동율은 변화가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 강우의 형태에 관계되는 형상모수의 변화가 강우량에 관계되는 척도모수의 변화보다 세심하게 분석되어야 한다는 것을 의미한다.

정격출력량이 최대가 되는 유량을 설계유량으로 선정할 경우, 주어진 소수력에너지를 효과적으로 사용할 수 있으며, 수문학적으로 최적의 설계상태임을 나타낸다.

## References

- [1] 이철형 외, 1992, 소수력자원의 정밀조사 및 최적개발분석 연구, 한국에너지기술연구소, 연구보고서.
- [2] 이철형 외, 1997, 소수력발전소 건설 타당성조사 기본계획 연구, 한국에너지기술연구소, 연구보고서.
- [3] 김길호, 이충성, 이진희, 심명필, 2007, "경제성분석에 의한 소수력개발의 최적규모 결정 방안", 한국수자원학회논문집, 제40권, 제12호.
- [4] 이충성, 김길호, 이진희, 심명필, 2007, "지형공간정보체계를 활용한 소수력개발의 입지분석", 한국수자원학회논문집, 제40권, 제12호.
- [5] Noyes, R., Small and Micro Hydro Electric Power Plants: Technology and Feasibility, Energy Technology Review No. 60, Noyes Data Corporation, U.S.A., 1980.
- [6] 石崎彰, 古市正敏, 小水力發電 讀本, オーム社, 1981.
- [7] Lee, C. H., Park, W. S., 1992, "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.
- [8] 박완순, 이철형, 심명필, 1997, "국내 소수력발전입지의 개발 타당성 분석", 대한토목학회논문집, 제17권, 제III-3호.
- [9] Park, W. S., Lee, C. H., and Jeong, S. M., 2001, "An Analysis of Performance Characteristics for Small Hydro Power Plants", KWRA, Vol. 2, No. 1.
- [10] 박완순, 이철형, 2003, "소수력발전소의 성능예측기법에 관한 연구", 한국수자원학회, 춘계학술대회.
- [11] 차중희 외, 1982, 소수력발전의 설계에 관한 연구, 대한전기협회, 조사연구논문.

박 완 순



1981년 고려대학교 토목공학과 공학사  
1999년 공주대학교 토목공학과 공학석사  
2003년 공주대학교 토목공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구본부 책임연구원  
(E-mail : pwsn@kier.re.kr)

이 철 형



1976년 인하대학교 항공공학과 공학사  
1981년 인하대학교 항공공학과 공학석사  
1993년 인하대학교 항공공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구본부 책임연구원  
(E-mail : lchg@kier.re.kr)