

소수력발전소의 성능예측기법에 관한 연구

이철형* · 박완순*

A Study on the Performance Prediction Methodology of Small Hydropower Plant

C. H. Lee*, and W. S. Park*

Key Words : SHP(소수력발전)/Load factor(가동율)/Design flowrate(설계유량)/Diversion dam(월류댐)

ABSTRACT

A model, which can analyze the hydrological performance for small hydropower(SHP) plants having no flow duration characteristics has been studied and developed. System performance of existing SHP plant under operating was analyzed by using the developed model. The annual operational rate of SHP plant showed that the data were in good agreement with predicted results from the model. Based on these results, several SHP sites to be exploited were selected and the performance characteristics were analyzed by using the developed model. Also, primary design values such as design flow rate, plant capacity, and operational rate were suggested. As a result, it was found that the methodology used in this study is useful tool to predict the hydrological system performances of SHP sites.

1. 서론

소수력발전은 다른 발전방식에 비하여 환경에 대한 영향이 거의 없는 청정에너지로서 효과적인 개발을 위해서는 소수력발전소의 성능에 영향을 미치는 제반 인자들에 대한 정확한 분석이 수행되어야 한다. 특히 소수력발전은 설계유량을 초과하는 유량이 발생할 경우, 댐의 상단으로 월류시켜 일정한 출력을 유지하는 월류댐을 이용하므로 대수력과는 전혀 다른 특성을 갖게 된다.

소수력발전소의 초기설계 제원중 중요한 요소로는 개발입지의 지형에 영향을 받는 유효낙차와 해당유역의 수문특성에 영향을 받는 설계유량을 들 수 있다.

특히 설계유량은 해당하천의 수문특성을 충분히 고려하여 산정하여야 주어진 조건하에서 유량을 최대한 활용할 수 있으며, 수차발전기의 선정과 댐수를 결정할 수 있게 된다.

소수력발전소의 설비용량은 발전소의 투자단가, 발전단가 및 가동율 등 경제성에 커다란 영향을 미치며, 이는 지형의 특성과 유량지속특성 및 개발투자비 등에 의하여 결정된다. 또한 이를 예측하기 위해서는 소수력발전입지에서의 수문학적 특성 및 경제성을 예측할 수 있는 해석적인 모델의 개발이 요구된다.

Robert Noyes는 하천에서 측정된 유량자료를 계급별로 정리하여 유량지속곡선을 작성하였으나, 이 방법은 계급간의 값의 차이가 균등하지 않고 또한 유량지속곡선이 특정한 함수로 표시되지 않으며, 하천에서의 실측자료를 사용하여야 하므로 국내에 산재된 대부분의 미계측하천을 대상으로 분석하기에는 어려움이 있

* 한국에너지기술연구원
E-mail : lchg@kier.re.kr, pwsn@kier.re.kr

다. 石崎彰과 古市正敏은 이미 구해진 유량지속곡선을 이용하여 소수력발전입지에서의 가동율을 결정하는 방법을 제시하였으나, 이 역시 유량이 측정되지 않은 미계측하천에서의 적용이 어렵고, 또한 소수력발전소의 전반적인 특성을 분석하는데는 많은 제한이 따른다. 따라서 국내 소수력발전입지의 경우, 시간과 경비 등 여러 가지 제한을 고려할 때 수문학적인 근거에 바탕을 둔 비교적간편한 기상 및 지형정보와 가정치만을 요구하는 방법들을 개발하여 사용하는 것이 바람직할 것이다.

유량의 실측자료가 부족하여 소수력발전입지의 유량자료를 획득하기 어려운 경우, 소수력개발을 위해 유량을 추정하고자할 때는 인근 지역의 정보와 소수력발전입지의 기상 및 지형정보를 이용하는 것이 일반적일 것이다. 이러한 방법으로는 가지야마공식과 KHRIS 모델, NRECA 모델 등이 있다.

본 연구에서 개발한 방법과 기개발된 모형들과의 비교를 통하여 유출량자료가 없는 소수력발전입지에서의 유량지속 특성과 성능특성을 표시하는데 본 연구에서 개발된 방법이 적합하다는 것을 확인하고, 기존 소수력발전소의 성능특성과 비교함으로써 모델의 유용성을 확인하였다.

2. 유량지속 특성 예측모델

우리나라의 경우 대부분의 소수력발전소는 하천의 상류에 위치하기 때문에 유입량에 대한 실측자료가 부족하여 유량지속곡선을 작성하기가 매우 어려운 실정이다. 그러나 하천의 유량은 하천이 소속되어 있는 해당유역면적내의 강수량에 의하여 결정되기 때문에 해당 유역면적내에서의 강수량자료를 분석함으로써 예측할 수 있다.

하천의 연평균유량은 해당유역의 연평균강수량과 유역면적으로부터 산정할 수 있다. 만일 유출계수가 연중 일정한 값을 유지한다고 하면 하천의 월평균유량은 다음과 같이 산정된다.

$$Q_m = 3.805 \times 10^{-4} k R_m A \quad (1)$$

소수력발전소에서의 유량은 유역면적내에 여러개의 강수량관측소가 존재하므로 각각의 관측소에서 측정된 강수량자료가 유기적으로 관계되어 유량지속곡선이 작성된다. (그림 1)과 같이 소수력발전소의 해당유역면적

내에 i 개의 강수량관측소가 존재한다면, 소수력발전소를 통과하는 유량은 다음과 같이 표시된다.

$$Q = A \sum W_i q_i \quad (2)$$

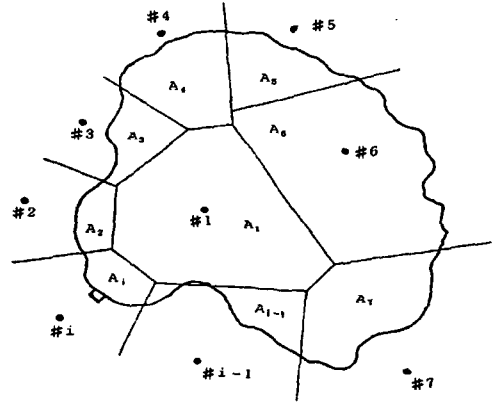


Fig. 1. Divided drainage area by Thiessen network

식(1)을 이용하여 관측소에서 측정된 월강수량자료를 단위유역면적당의 월평균유량으로 환산할 수 있으며, 이를 이용하여 단위유역면적당의 유량지속곡선을 작성할 수 있다. 유량지속곡선은 유량을 크기별로 누적시킨 것으로 누가밀도함수와 동일한 개념이다.

소수력발전소에서의 유량상태는 다음과 같이 Weibull분포의 누가밀도함수와 확률분포함수로 표시할 수 있다.

$$F(Q) = A \sum W_i [1 - \exp\{-(q_i/\beta_i)a_i\}] \quad (3)$$

$$P(Q) = A \sum W_i (a_i/\beta_i)(q_i/\beta_i)^{a_i-1} \exp\{-(q_i/\beta_i)a_i\} \quad (4)$$

또한 소수력발전소에서의 유량지속곡선을 나타내는 유량지속함수는 다음과 같이 구해진다.

$$D(Q) = A \sum W_i \exp\{-(q_i/\beta_i)a_i\} \quad (5)$$

3. 소수력발전소의 출력특성 예측모델

소수력발전은 유량과 낙차로부터 에너지를 추출하

는 것으로 소수력발전소에서 얻을 수 있는 순수한 수력에너지는 다음과 같다.

$$P_i = \rho Q H \quad (6)$$

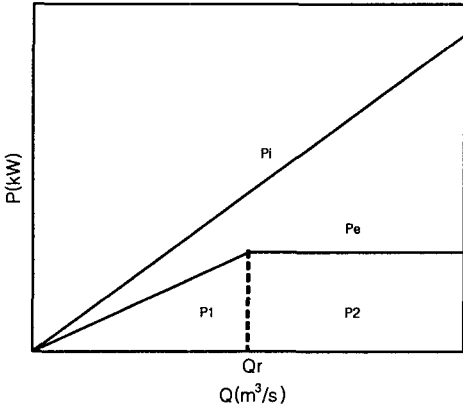


Fig. 2. Power characteristics of SHP plant

(그림 2)는 단위 낙차, 단위시간당 단일기의 소수력 발전소에 대한 유량변화에 따른 출력의 변화를 나타내는 그림이다. 순수한 수력에너지 P_i 는 낙차가 일정할 경우, 유량 변화에 따라 선형적으로 변하게 되지만 소수력발전소의 출력 P_a 는 시스템의 설계유량 Q_r 이 존재하기 때문에 출력특성은 바뀌게 된다.

소수력발전소의 출력은 설계유량 이하에서는 유량 변화에 따라 거의 선형적으로 변하게 되지만, 소수력발전소의 효율로 인하여 순수한 수력에너지보다 항상 적은 값을 갖게 된다. 또한 설계유량 이상에서는 설계유량에 해당하는 유량만을 사용하고 이를 초과하는 유량은 댐 상단으로 방류하기 때문에 출력은 일정하게 유지된다.

소수력발전소를 통과하는 유량은 계절별, 월별로 다르기 때문에 소수력발전소에서 발생하는 에너지는 쉽게 구할 수 없다. 이 값들을 해석적으로 구하기 위해서는 확률밀도함수를 이용하여야 한다. 식(4)의 확률밀도함수를 이용하여 소수력발전소에서 단위시간당 생산되는 발전량 P_a 를 구하면 식(7)과 같다.

여기서 P_1 , P_2 는 각각 소수력발전시스템의 부분 및 정격부하상태에서의 발전량을 나타낸다.

$$\begin{aligned} P_e &= \rho g H \eta \left\{ \int_0^{Q_r} P(Q) Q dQ + Q_r \int_{Q_r}^{\infty} P(Q) dQ \right\} \\ &= \rho H \eta (S_1 + S_2) \\ &= P_1 + P_2 \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)을 이용하여 소수력발전소의 설비용량, 연평균 가동을 그리고 연간발전량을 산정하면 다음과 같다.

$$C = \rho H Q_r \eta \quad (8)$$

$$L_f = (S_1 + S_2) / Q_r \quad (9)$$

$$E_a = 8760 C L_f \quad (10)$$

4. 결과 및 검토

소수력발전입지의 특성을 분석하기에 앞서 본 연구를 통하여 개발된 유량지속곡선 산정방법의 적용가능성을 판단하였다.

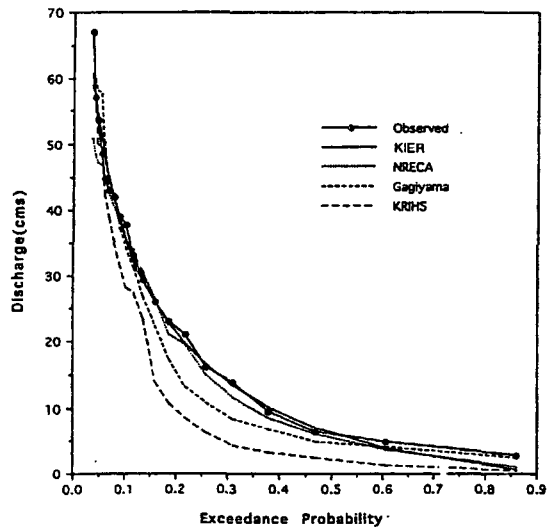


Fig. 3. Flow duration curve of small hydropower site on Pyungchang river

Fig. 3은 강원도 평창군 평창읍 뇌운리에 위치한 유

역면적이 640.6km²인 평창강 수력지점에 대해 동일 수계내의 실측 유출량자료(1963-1979)가 있고 유역특성이 비슷한 후포 수위표 지점의 비유량을 적용하여 계산한실측치와 앞에서 언급한 적용방법과 본 연구에 의하여 개발된 방법을 비교한 것이다. 유출량추정을 위하여 창촌, 진부, 봉평, 대화, 방림, 평창 등 6개로 분할된 건설부와 기상청 등의 강우량자료(1973-1992)와 기상청 소속의 원주, 흥천, 대관령측후소의 일조율, 기온, 상대습도, 증발량 등의 기상자료(1973-1992) 및 지형자료 등을 이용하였다.

Fig. 3의 경우, 실측치와 추정치의 자료기간이 다르나 각각의 기간에 대한 초과확률을 나타내는 유량지속곡선에서는 상호 비교가 가능하다. 본 연구에서 개발한 KIER와 NRECA방법이 비교적 실측치와 잘 맞으며, 초과확률 25%에 해당하는 유량은 실측치, KIER, NRECA, Gagiyma, KHRIS의 경우 각각 16.2, 16.5, 15.0, 10.7, 6.2m³/s이다. 소수력개발 규모에 적합한 다른 입지에 대한 유출량자료가 부족하여 더 이상의 비교는 어려운 점이 있으나, Fig. 3의 결과로 판단할 때, 본 연구에서 개발된 방법이 유출량자료가 없는 소수력발전입지에서의 유량지속특성을 표현하는데 다른 방법에 비하여 적합하다고 할 수 있다.



Fig. 4. Divided drainage area of Bongwha plant by Thissen network

본 연구에서 성능분석대상으로 선정한 봉화소수력발전소는 낙동강 상류에 위치하고, 유역면적은 약 845.6km²이다. Fig. 4는 봉화소수력발전소에 해당되는 유역면적의 형상을 보여주는 것으로 전체형상은 원형

에 가까우며, Thissen network에 의하여 7개의 관측소의 강우량상태에 영향을 받는다는 것을 보여준다. 봉화소수력발전소의 개요는 Table. 1과 같다. Table. 2는 Fig. 4에서와 같이 분할된 유역면적의 특성을 나타낸다.

Table. 1. Descriptions of Bongwha plant

Specifications	Design values
A, km ²	845.6
Qr, m ³ /s	17.8
H _e , m	13.6
C, kW	2,000

Table. 2. Characteristics of divided drainage areas

Weather Station	A _i (km ²)	W _i (%)	β _i (m ³ /s)	α _i
Sukpo	197.7	23.4	0.0115	0.6823
Sukhyun	190.9	22.6	0.0130	0.7690
Dochun	74.6	8.8	0.0114	0.7689
Hyundong	97.0	11.5	0.0107	0.7657
Namwheryong	187.1	22.1	0.0141	0.8631
Soobi	7.5	0.9	0.0105	0.8218
Jaesan	90.8	10.7	0.0108	0.7852
Total	845.6	100.0		

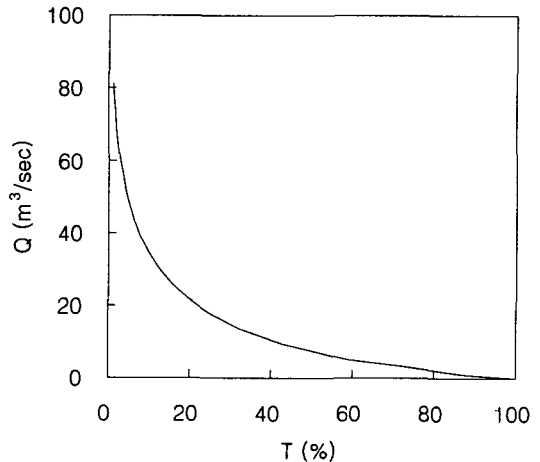


Fig. 5. Flow duration curve at Bongwha SHP plant

Fig. 5는 Table. 2의 특성이 조합되어 구해진 봉화소

수력발전소에 대한 유량지속곡선을 보여준다.

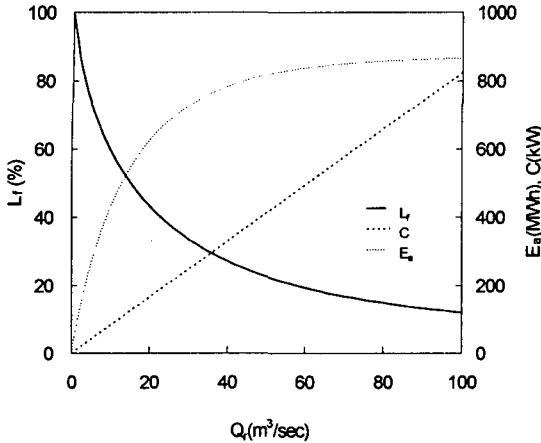


Fig. 6. Capacity, operational rate and electricity production with flow rate for Bongwha SHP plant

Fig. 6는 봉화소수력발전소에서의 유량의 변화에 따른 가동율, 설비용량 및 연간발전량의 변화를 나타내는 그림이다. 이 때 발전소의 효율은 η 는 0.8로 가정하였다.

소수력발전소의 설비용량은 유량변화에 따라 거의 선형적으로 변하게 된다. 그러나 가동율은 유량이 증가함에 따라 감소하게 되며, 또한 유량이 작은 영역에서는 급히, 큰 영역에서는 서서히 감소한다. 이러한 현상은 유량이 작을 경우가 큰 경우보다 소수력발전소에서 얻을 수 있는 단위시간당의 평균발전량이 설비용량에 비해 상대적으로 크기 때문이다. 연간전기생산량은 설계유량을 크게할수록 증가하게 되며, 설계유량을 점차 크게 선정하면 증가율이 서서히 둔화된다. 이러한 현상은 유량이 커짐에 따라 가동율이 점차 감소하기 때문이다. 봉화소수력발전소의 경우, 설계유량을 $17.8\text{m}^3/\text{s}$ 로 선정하여 설비용량을 결정하였기 때문에 연평균가동율은 44%로 예측된다.

Fig. 7은 봉화소수력발전소의 연도별 가동율의 변화를 보여주는 것으로 직선으로 표현된 것은 성능예측을 통하여 산정된 결과를 나타낸다. 실제 소수력발전소의 연평균가동율은 해당년도의 강우상태에 영향을 크게 받는다. 그림에서 '93, '94, '95, '96년도의 경우 강우상태가 다른 연도에 비해 작기 때문에 연평균가동율이 낮게 나타난다. 봉화소수력발전소의 경우 12년간의 평

균가동율은 41.7%를 나타내고, 성능예측을 통하여 산정된 가동율은 44.0%를 나타낸다.

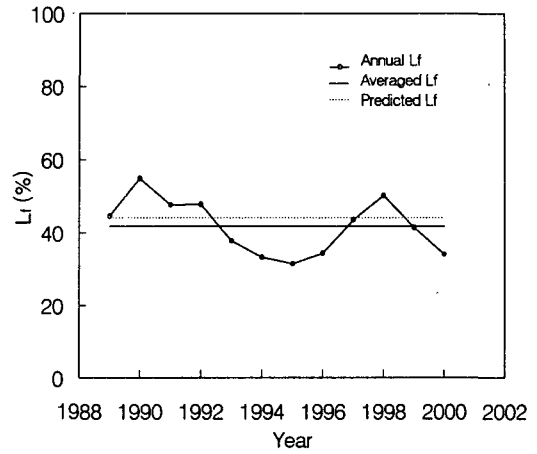


Fig. 7. Performance evaluation at Bongwha SHP plant

성능예측을 통하여 산정된 연평균가동율은 장기간의 강우량자료를 분석하여 산정된 것으로 소수력발전소의 운영상태가 최적으로 유지된다고 가정하여 실제 소수력발전소의 가동율에 비하여 높은 것으로 나타나지만 소수력발전소의 운영방법을 개선함으로써 실제 가동율이 성능예측에 보다 근접할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. The characteristics of SHP sites

SHP sites	A(km ²)	H _n (m)	H _d (m)
Daeki	215.0	25.8	5.0
Duckchon	2025.0	14.1	5.0
Kujul	233.0	21.6	6.0
Dodon	733.0	8.1	5.0
Misan	349.0	2.1	6.0
Kikok	277.9	20.3	4.0
Hweryong	955.8	12.2	5.0
Daeya	170.8	22.0	5.0
Yangchon	1096.6	5.9	4.0
Keuwoon	2294.0	0.0	14.0
Woonchon	4208.8	0.0	4.5
Sasuk	1801.4	0.0	7.0

Table 4. Performance predictions of SHP sites

SHP sites	$Q_r(m^3/s)$	$H_e(m)$	$C(kW)$	$L_f(\%)$
Daeki	6.0	29.2	1370	43.1
Duckchon	38.5	17.8	5370	51.2
Kujul	7.0	26.1	1430	41.3
Dodon	21.5	12.2	2056	45.4
Misan	10.0	17.1	1340	43.5
Kikok	7.0	22.8	1250	49.9
Hweryong	23.5	16.0	2940	56.1
Daeya	4.5	25.5	900	48.0
Yangchon	28.5	9.2	2050	54.9
Keuwoon	85.5	10.7	7170	37.0
Woonchon	94.0	3.2	2350	58.7
Sasuk	53.5	5.0	2090	51.9

이러한 결과를 기본으로하여 소수력발전소 후보입지에 대한 성능을 분석할 수 있다. Table. 3은 소수력발전 후보입지로 선정된 12개소의 특성을 나타내는 것이며, Table. 4는 본 연구에서 개발된 성능예측방법에 의하여 도출된 후보지별 초기설계제원을 나타낸다.

5. 결론

본 연구를 통하여 개발된 유량지속함수는 유입량에 대한 실측자료가 부족하여 유량지속곡선을 작성하기가 매우 어려운 우리나라의 소수력발전소의 경우, 매우 유용하게 사용할 수 있고, 또한 월류댐을 갖는 소수력발전소의 성능예측모델을 통하여 소수력발전소의 성능 특성을 잘 표현할 수 있다는 것이 밝혀졌다.

실제 소수력발전소의 연평균가동율은 해당년도의 강우상태에 커다란 영향을 받는 것으로 나타났으며, 소수력발전소의 운영방법을 개선함으로써 실제 연평균가동율이 성능예측에 보다 근접할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 개발된 소수력발전소의 성능예측 기법은 기존의 소수력발전소뿐 아니라 소수력개발후보지에 대한 수문학적 설계를 신뢰성 있게 수행할 수 있다는 것을 보여준다.

참고문헌

- (1) Robert Noyes, Small and Micro Hydro-Electric Power Plants; Technology and Feasibility, Energy Technology Review No.60, Noyes Data Cooperation, U.S.A., 1980.
- (2) 石崎彰, 古市正敏, 小水力發電 讀本, オ-ム社, 1981.
- (3) 이상훈 외, 중소수계의 하천유출량 추정모델 개발, 국토개발연구원, 1987.
- (4) Crawford, H. N. and Thurin, M.S., Hydrologic Estimates for Small Hydroelectric Projects, NRECA, Washington, U.S.A, 1981.
- (5) 이철형 외, 소수력발전소 건설 타당성조사 기본계획 연구, 한국에너지기술연구소, 연구보고서, 1997.
- (6) C. H. Lee, W. S. Park, Performance Analysis Methodology for Small Hydropower Plants in Korea and Its Application, ISES 2005 Conference, Orlando Florida, U.S.A, 2005.