

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 18, No. 3, 1998

소수력발전소의 건설 타당성분석 기법

박완순*, 이철형*, 정상만**

* 한국에너지기술연구소

** 공주대학교

Methodology of Feasibility Assessment for Small Hydropower Plant

W. S. Park*, C. H. Lee*, S. M. Jeong**

* *Korea Institute of Energy Research*

** *KJNU*

Abstract

The methodology and feasibility analysis model for small hydropower plant has been studied and developed. It consists of two main part, the performance prediction model to estimate the performance characteristics and economics analysis model to evaluate economical characteristics for surveyed sites. The performance characteristics and feasibility assessment for surveyed sites were analyzed, using developed models. Also, primary design specifications such as design flowrate, capacity, load factor were estimated and discussed for surveyed sites in Dan-yang and feasibility was suggested through analyzing the investment, unit cost and payback period.

1. 서 론

화석에너지가 빈곤한 우리나라는 제1, 2차 석유파동 이후, 석유에 대한 대체에너지로서의 소수력개발을 위한 관심이 고조되면서 2차에 걸쳐 개발가능한 유망후보지에 대한 자원실측을 통하여 소수력개발을 위한 실제적인 소수력자원조사가 수행되었다^[1,2]. 소수력발전소는 현재 16개소가 민간주도로 건설되어 운영되고 있으며, 3개소가 건설 중이고 11개소가 허가를 추진 중에 있어 이를 모두 포함하면 총 30개소에 49,820kW의 용량으로 이는 의암댐을 상회하는 용량이다.

소수력발전은 화력 및 원자력과 비교할 때 환경에 대한 영향이 거의 없는 청정한 에너지로서 개발이 유망한 에너지이지만, 단위출력당 투자비용이 화력 및 원자력에 비하여 높고 대수력 발전에 비해 더 많이 소요되는 것으로 알려져 있다. 그러나 소수력발전은 발전지점의 특성, 개발형식 및 설비용량 등에 따라 경제성에 커다란 영향을 받기 때문에 이에 대한 정확한 분석이 수행된다면, 반드시 소수력발전의 경제성이 낮다고 할 수만은 없다.

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

Robert Noyes^[3]는 하천에서 측정된 유량자료를 계급별로 정리하여 유량지속곡선을 작성하였으나, 이 방법은 계급간의 값의 차이가 균등하지 않고 또한 유량지속 곡선이 특정한 함수로 표시되지 않으며, 하천에서의 실측자료를 사용하여야 하므로 국내에 산재된 대부분의 미계측하천을 대상으로 분석하기에는 어려움이 있다. 石崎彰과 古市正敏^[4]은 이미 구해진 유량지속곡선을 이용하여

소수력발전 입지에서의 가동율을 결정하는 방법을 제시하였으나, 이 역시 유량이 측정되지 않은 미계측하천에서의 적용이 어렵고, 또한 소수력발전 입지의 전반적인 특성을 분석하는데는 많은 제한이 따른다. 따라서 시간과 경비 등 여러 가지 제한을 고려할 때 수문학적인 근거에 바탕을 둔 비교적 간편한 기상 및 지형정보와 가정치만을 요구하는 방법들을 개발하여 사용하는 것이 바람직할 것이다.

유량의 실측자료가 부족하여 유량자료를 획득하기 어려운 경우 소수력개발을 위해 유량을 추정하고자할 때는 인근 유역의 정보와 소수력개발 입지의 기상 및 지형정보를 이용하는 것이 일반적이다. 이러한 방법으로는 가지야마공식과 KHRIS 모델^[5], NRECA 모델^[6] 등이 있다.

본 연구에서는 미계측 하천의 유량지속특성을 고찰하기 위해 누가밀도함수를 사용하여 강수자료를 특성화하였고, 특성화된 유량지속함수를 이용하여 소수력발전 입지의 성능특성을 분석하고 예측할 수 있는 성능분석모델을 개발하였으며, 이를 기본으로하여 발전단가 및 투자비회수기간 등을 예측할 수 있는 경제성분석모델을 개발하였다. 또한 이의 응용으로 개발된 성능분석모델과 소수력발전 후보지에 대한 실측자료를 이용하여 발전단가를 가장 낮게하여 주는 설계유량, 설비용량 등의 기본설계제원을 제시하였고, 이에 따른 개발투자비, 발전단가 및 투자비회수기간 등의 경제성을 분석하여 소수력발전 입지의 건설타당성을 제시하였으며, 개발된 모델은 소수력발전 입지의 성능특성 뿐 아니라 초기설계시 성능예측과 건설타당성 분석에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

2. 소수력발전 입지의 성능특성 분석

우리나라의 대부분의 소수력발전 입지는 하천

의 상류에 위치하기 때문에 유입량에 대한 실측 자료가 부족하여 유량지속곡선을 작성하기가 매우 어려운 실정이다. 그러나 하천의 유량은 하천이 소속되어 있는 해당유역면적내의 강수량에 의하여 결정되기 때문에 해당유역면적내에서의 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^[7].

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

식(1)을 이용하여 관측소에서 측정된 월강수량 자료를 단위유역면적당의 월평균유량으로 환산할 수 있으며, 이를 이용하여 단위유역면적당의 유량지속곡선을 작성할 수 있다. 유량지속곡선은 유량을 크기별로 누적시킨 것으로 누가밀도함수와 동일한 개념이기 때문에 특정한 누가밀도함수의 형태로 표시할 수 있다. 본 연구에서는 월강수량 자료를 단위유역면적당의 월평균유량자료로 환산하여 구해진 단위유역면적당의 유량지속곡선을 Weibull분포의 누가밀도함수를 이용하여 특성화하였다.

2변수 Weibull분포의 누가밀도함수와 확률분포함수는 다음과 같이 표시된다.

$$F(q) = \int_0^q P(q) dq = 1 - \exp\{-(q/\beta)^\alpha\} \quad (2)$$

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

소수력발전 입지에서의 유량은 해당 유역면적내에 여러개의 강수량관측소가 존재하므로 각각의 관측소에서 측정된 강수량자료가 유기적으로 관계되어 유량지속곡선이 작성된다. Fig. 1과 같이 소수력발전 입지의 해당 유역면적내에 i개의 강수량관측소가 존재한다면, 소수력발전 입지를 통과하는 유량은 다음과 같이 표시된다.

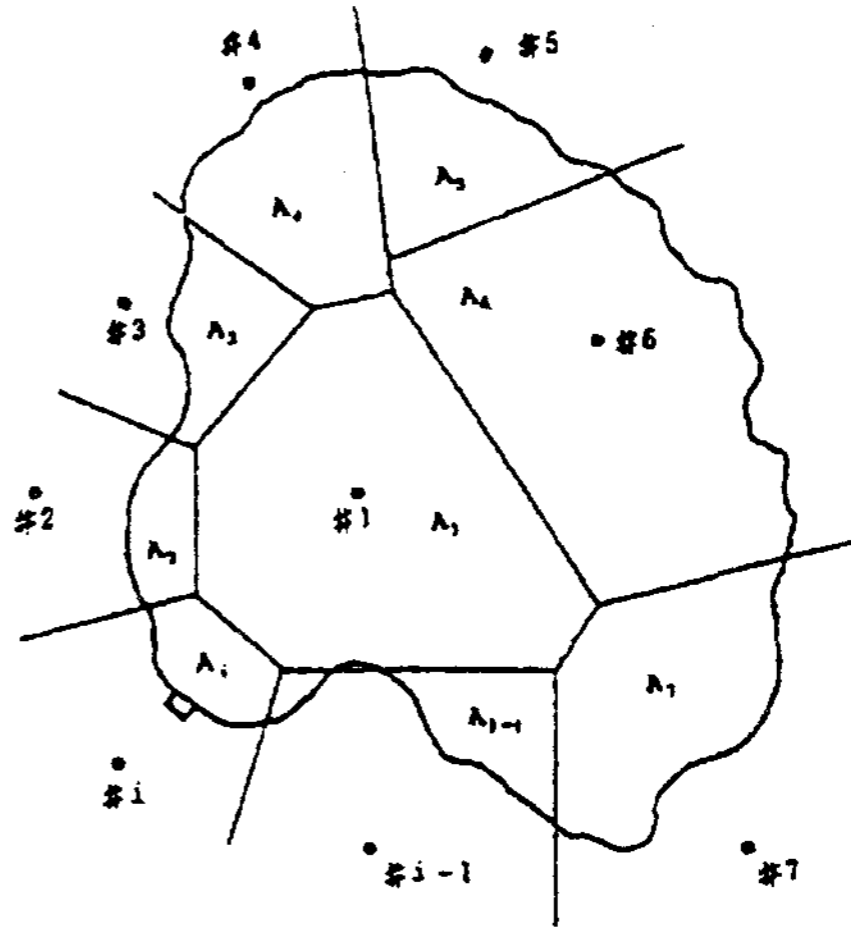


Fig. 1. 강수량관측소에 의해 분할된 유역면적

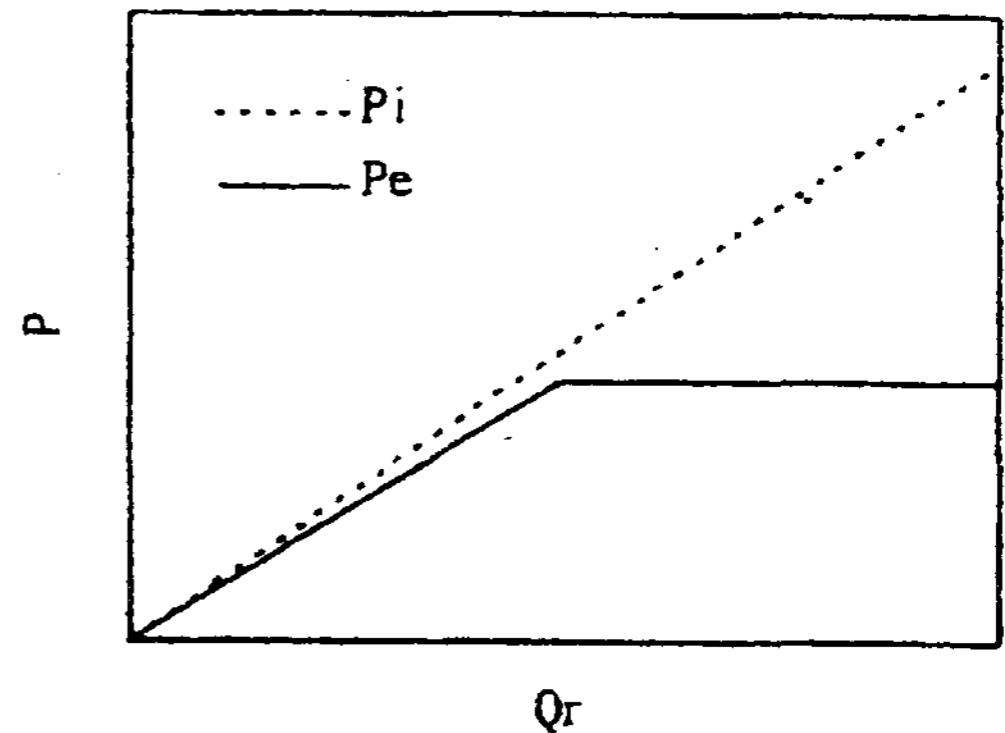


Fig. 2. 소수력발전소의 출력특성

$$Q = A \sum W_i q_i \quad (4)$$

따라서 소수력발전 입지에서의 유량에 관한 누가밀도함수와 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$F(Q) = A \sum W_i [1 - \exp\{-(q_i/\beta_i)^{\alpha_i}\}] \quad (5)$$

$$P(Q) = A \sum W_i (\alpha_i/\beta_i)(q_i/\beta_i)^{\alpha_i-1} \exp\{-(q_i/\beta_i)^{\alpha_i}\} \quad (6)$$

또한 유량지속곡선을 나타내는 유량지속함수는 다음과 같이 구해진다^[8].

$$D(Q) = A \sum W_i \exp\{-(q_i/\beta_i)^{\alpha_i}\} \quad (7)$$

Fig. 2는 유효낙차가 일정할 경우, 단일기로 구성된 소수력발전소에 대하여 유량변화에 대한 단위시간당 출력의 변화를 나타내는 그림이다.

수력에너지는 유량변화에 따라 선형적으로 변하게 되지만 소수력발전소의 출력은 수차발전기의 설계유량이 존재하기 때문에 특성이 바뀌게 된다. 소수력발전소의 출력은 설계유량 이하에서는 유량변화에 따라 거의 선형적으로 변하게 되지만, 수차발전기의 효율로 인하여 순수한 수력에너지보다 항상 적은 값을 갖는다. 또한 설계유량 이상에서는 설계유량에 해당하는 유량만을 사용하고 이를 초과하는 유량은 월류시키기 때문에 출력은 일정하게 유지된다.

따라서 소수력발전소에서 단위시간당 생산되는 전기에너지량을 구하면 다음과 같다.

$$P_e = \rho g H_e \eta \left\{ \int_0^{Q_r} P(Q) Q dQ + Q_r \int_{Q_r}^{\infty} P(Q) dQ \right\} \\ = \rho g H_e \eta (S_1 + S_2) \quad (8)$$

또한 소수력발전소의 설비용량, 가동율, 연간전기생산량은 다음과 같다.

$$C = \rho g H_e \eta Q_r \quad (9)$$

$$L_f = (S_1 + S_2) / Q_r \quad (10)$$

$$E_a = 8,760 C L_f \quad (11)$$

소수력발전소의 설비용량은 유효낙차와 유량에 의해 결정된다. 소수력발전소의 경우, 유효낙차는 최대사용낙차에서 취수구, 밸브, 수압관, 방수로 및 수로에서의 손실을 제외한 것으로 표시된다. 일반적으로 수로에서의 손실을 제외한 제손실은 최대사용낙차의 5%를 취하면 충분하므로 유효낙차는 다음과 같이 표시된다^[9].

$$H_e = H \times 0.95 - H_l \quad (12)$$

3. 소수력발전 입지의 경제성분석

소수력발전 입지를 개발하기 위하여 소요되는 비용은 정확한 설계와 많은 자료가 요구되나 본 연구에서는 중요한 몇가지 요소로 구분하여 계산하였다. 소수력발전 입지의 개발에 소요되는 직접비로는 댐공사비, 터널공사비, 발전설비비, 변전설비비, 송배전설비비 및 발전소 부속건물비 등이 있다. 여기서 발전소 부속건물비는 발전소의 크기에 비례하므로 이를 제외한 직접비의 10%로, 발전소의 설계비 등의 간접비는 직접비 총액의 20%로 가정하였으며, 소수력발전 입지를 개발하기 위한 초기투자비는 다음과 같이 산정된다^[10].

$$C_1 = \{(C_d + C_t + C_m + C_{tr} + C_l) \times 1.1\} \times 1.2 \quad (13)$$

또한 소수력발전 입지의 개발기간을 1년으로 가정하였을 경우, n년후의 총투자비, 총수익, 발전단가 및 B/C는 다음과 같이 표시된다[2].

$$C_c = C_i(1+i_r) + \sum_{n=1}^n \frac{OM(1+i_o)^n}{(1+i_r)^n} \quad (14)$$

$$C_g = \sum_{n=1}^n E_a C_e \frac{(1+i_u)^n}{(1+i_r)^n} \quad (15)$$

$$C_u = \left\{ \frac{i_r(1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1} + O_m \right\} \times \frac{C_c}{C \times 8,760 \times L_f} \quad (16)$$

$$B/C = C_g / C_c \quad (17)$$

여기서 소수력발전 입지를 개발할 경우, 투자비 회수기간은 B/C비가 1이 되는 기간으로 산정할 수 있다.

4. 결과 및 검토

소수력개발 입지의 건설타당성 분석에 앞서 본

연구를 통하여 개발된 유량지속곡선 산정방법의 적용가능성을 판단하였다. Fig. 3은 강원도 평창군 평창읍 뇌운리에 위치한 유역면적이 640.6km²인 평창강 수력지점에 대해 동일 수계내의 실측 유출량자료(1963~1979)가 있고 유역특성이 비슷한 후포 수위표 지점의 비유량을 적용하여 계산한 실측치와 앞에서 언급한 적용방법과 본연구에 의하여 개발된 방법을 비교한 것이다^[10]. 유출량 추정을 위하여 창촌, 진부, 봉평, 대화, 방림, 평창 등 6개로 분할된 건설부와 기상청 등의 강우량자료(1973~1992)와 기상청 소속의 원주, 홍천, 대관령 측후소의 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 상호비교가 가능하다. 본 연구에서 개발한 Weibull 분포 특성화와 NRECA 방법이 비교적 실측치와 잘 맞으며, 초과확률 25%에 해당하는 유량은 실측치, Weibull분포특성화, NRECA, 가지야마, KHRIS의 경우 각각 16.2, 16.5, 15.0, 10.7, 6.2m³/s 이다. 소수력개발 규모에 적합한 다른 입지에 대한 유출량 자료가 부족하여 더 이상의 비교는 어려운 점이 있으나, Fig. 3의 결과로 판단할 때 본연구에서 개발된 방법이 유출량 자료가 없는 소수력개발 후보지에서의 수자원 특성을 표현하는데 다른 방법에 비하여 적합하다고 할 수 있다.

본 연구에서 분석하고자하는 소수력개발 입지는 충북 단양군 영춘면에 위치한 상리지점으로서, 총 유역면적은 4820.51km²이고, 시설용량은 소수력발전소의 허용 최대용량인 3,000 kW로 설정하였다. 또한 댐축조 후 만수위에 포함되는 일부 농경지에 대하여 공시지가로 보상할 수 있는 비용을 발전소 건설비에 포함하여 경제성을 분석하였다. Fig. 4는 상리지점의 성능특성을 나타낸다.

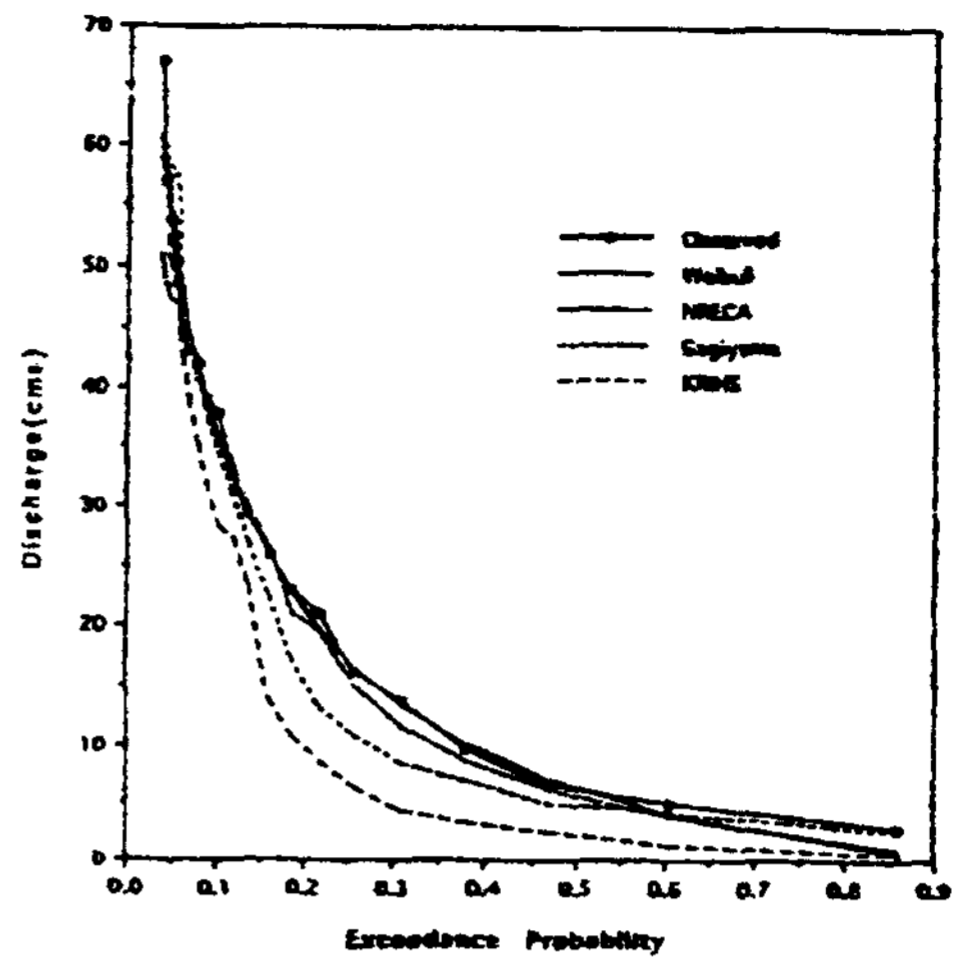


Fig. 3. 평창강 수력지점의 유량지속곡선

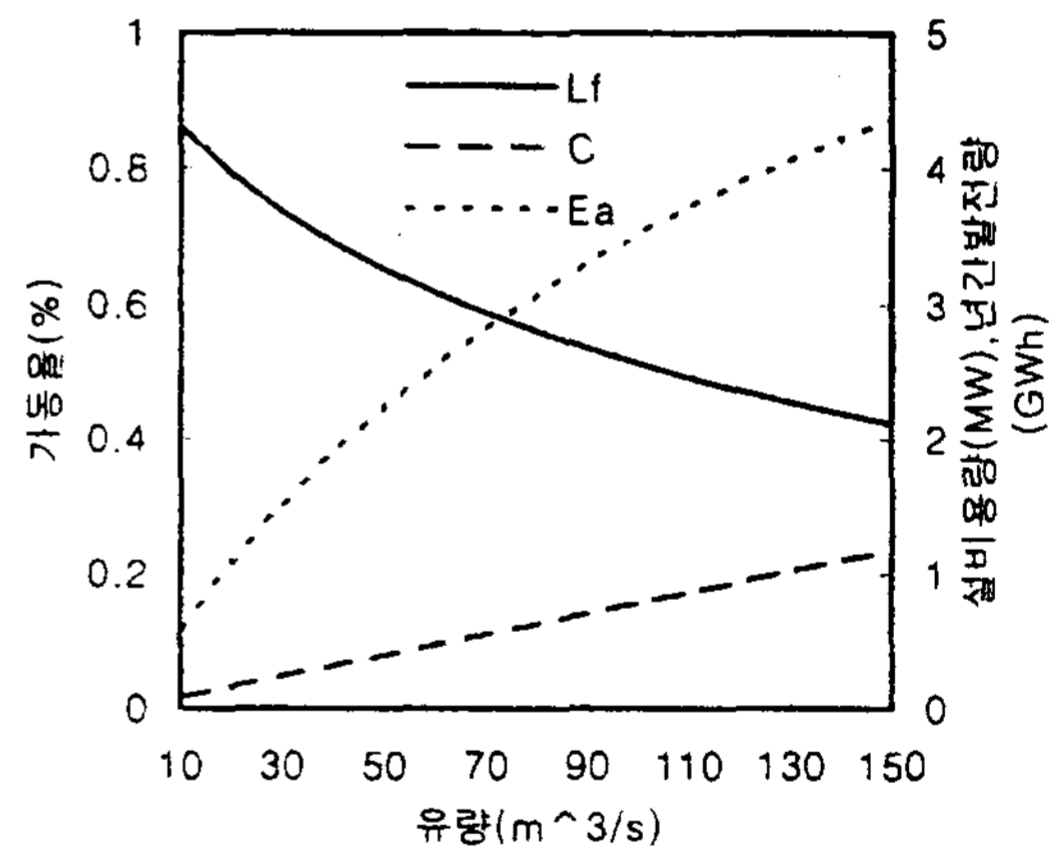


Fig. 4. 상리 지점의 성능특성곡선

상리 소수력 입지 상류에 대하여 빈도해석을 통한 설계홍수량을 산정하였다^[4]. 기본 및 계획홍수량은 5년, 10년, 50년, 80년, 100년, 150년, 200년 등 7개 빈도에 대하여 산정한후 하천의 중요도를 고려하여 100년 및 200년빈도 홍수량 채택하였으며 결과는 각각 12,815m³/s, 14,923m³/s로 산정되었다^[11]. 홍수위 계산은 7개빈도에 대하여 빈도별 홍수량을 토대로 부등류 공식인 표준축차계산법을 사용하였고, 계획홍수위는 하천의

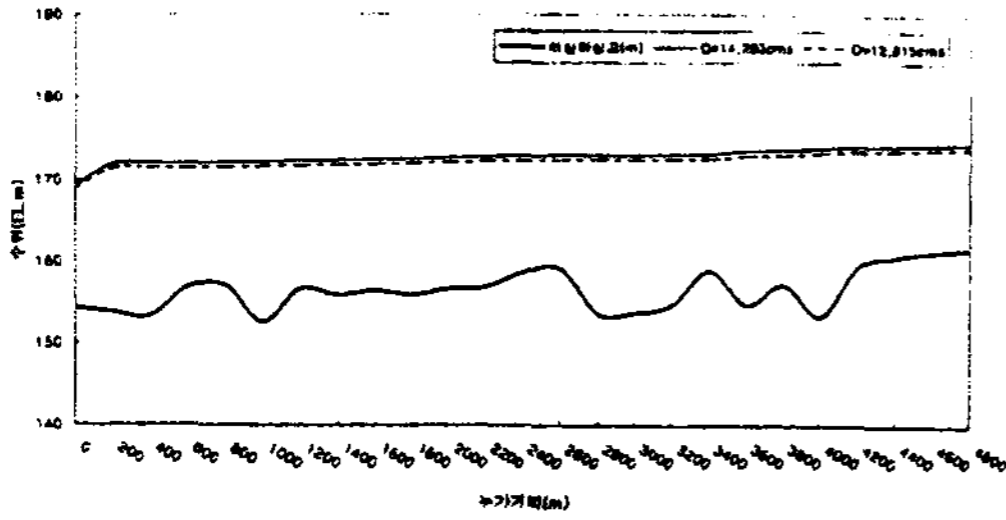


Fig. 5. 댐설치후 홍수위의 변화

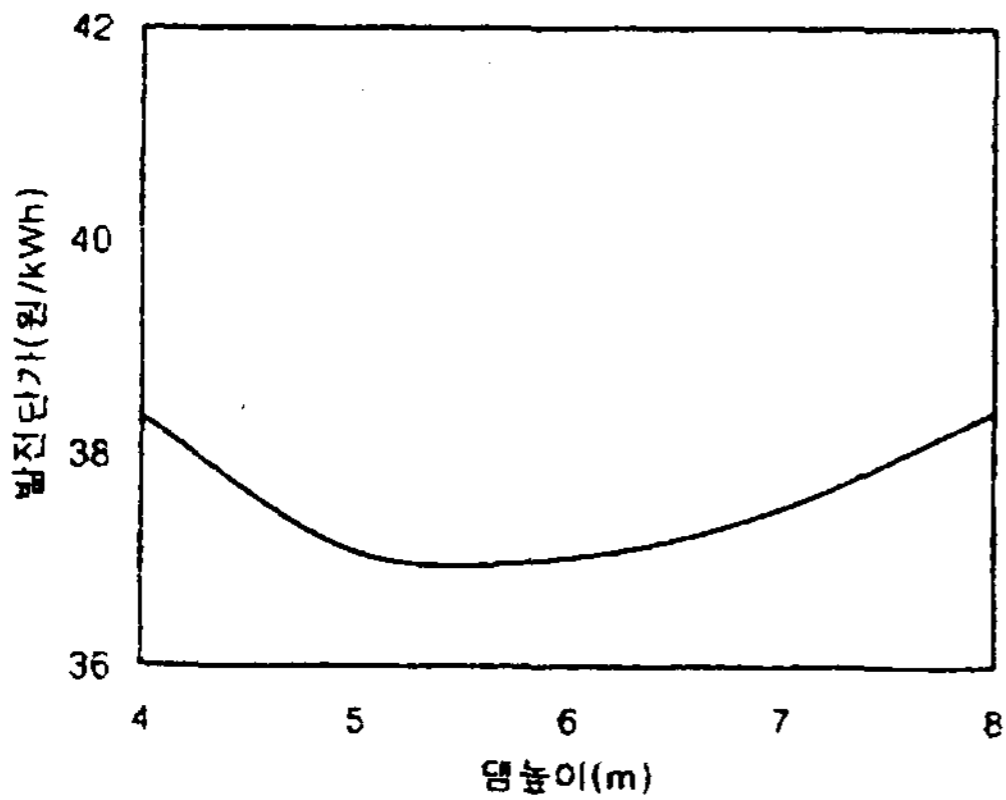


Fig. 6. 댐 높이에 따른 발전단가의 변화

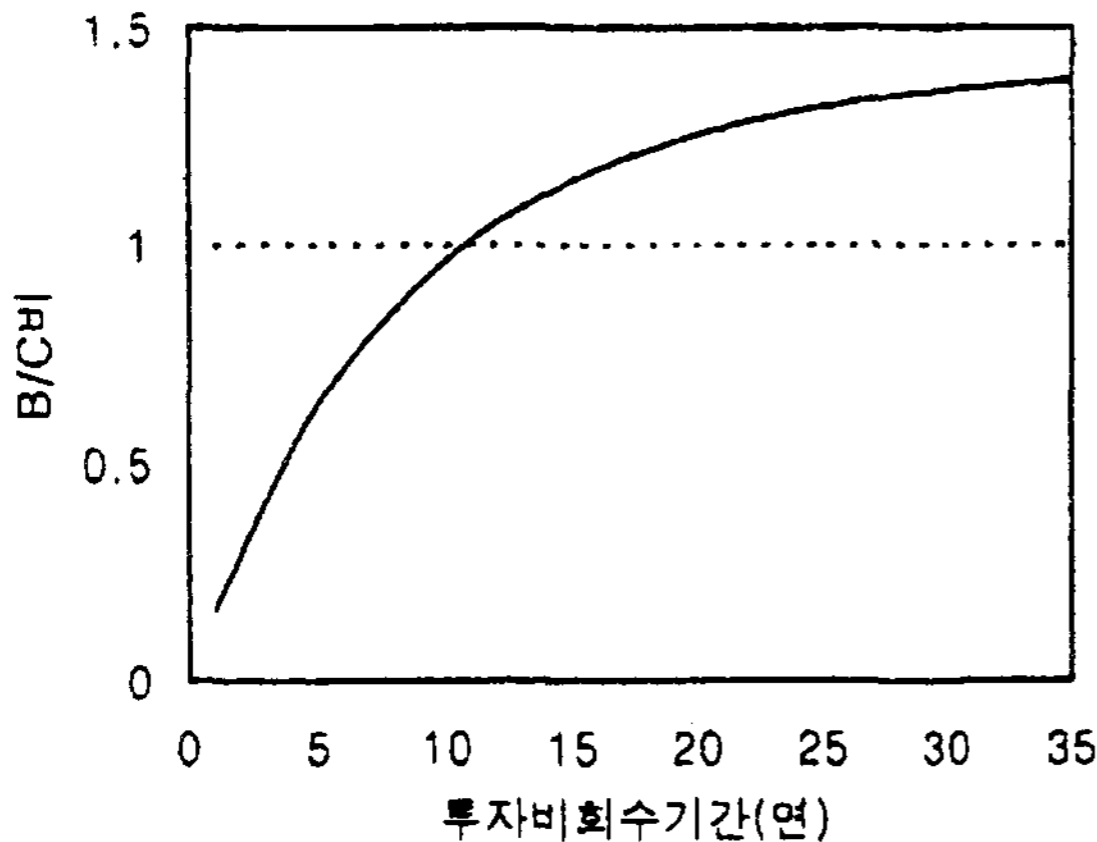


Fig. 7. 투자비회수기간의 변화

중요도 및 연안토지이용 등을 고려하여 100년과 200년 빈도 홍수위를 계산하였다^[12,13]. Fig. 5

는 댐설치후 홍수위 결과를 나타낸다.

Fig. 6, Fig. 7은 경제성 분석결과로서 상리 입지의 댐높이 변화에 따른 발전단가의 변화와 투자비회수기간의 변화를 나타낸다. 본 연구에서는 소수력 발전소의 경제성을 검토하기 위해 $ir = 10\%$, $Om = 3.63\%$, $N = 35$ 년, $iu = 0\%$ 그리고 유지관리비의 증가율은 0% 로 하였으며, 전력판매가격 $Ce = 54.84$ 원/kWh, 소수력 발전소의 건설비는 순수한 자기자본의 투자로 가정하였다.

상리 소수력발전소 건설입지의 경우, 댐의 높이가 증가할수록 경제성이 좋아지지만, 강원도계까지의 고저차를 고려하여 댐의 최대높이를 6.0m로 하였을 경우, 최적의 초기설계제원으로서 설계유량은 $70.5\text{m}^3/\text{s}$, 가동율은 58.62% , 연간전기생산량은 $16,813\text{MWh}$, 발전단가는 37.03 원/kWh으로 산정되고 투자비 회수기간이 11년으로 나타나 경제성을 확보하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

하천의 상류에 위치하게 되는 대부분의 소수력발전 입지의 경우, 유입량 등에 대한 실측자료가 부족하여 유량지속곡선을 작성하기가 매우 어려운 실정이다. 그러나 하천의 유량은 하천이 소속되어 있는 해당 유역면적내의 강수량에 의해 결정되기 때문에 강수자료를 이용하여 구할 수 있으며, 이 때 강수자료는 누적밀도함수를 이용하여 특성화될 수 있음이 밝혀졌다. 또한 특성화된 유량지속함수를 이용하여 소수력발전소의 성능을 분석할 수 있는 성능분석 및 경제성 예측 모델이 개발되었다. 본 모델은 유량실측자료가 부족한 소수력발전 입지의 최적설계가 가능하며, 이 결과를 적용함으로써 설계에 관한 신뢰성 향상과 개발여부의 판단에 효과적으로 사용될 수 있음이 밝혀졌다.

기 호 설 명

A ; 유역면적(km²)
 B/C ; 수익/비용의 비
 C ; 소수력발전소의 설비용량(kW)
 C_c ; 소수력발전입지의 총투자비(원)
 C_d ; 댐 건설비(원)
 C_e ; 전력판매단가(원/kWh)
 C_g ; 소수력발전소의 총수익(원)
 C_i ; 소수력발전소의 초기투자비(원)
 C_l ; 송배전설비비(원)
 C_m ; 발전설비비(원)
 C_t ; 터널공사비(원)
 C_{tr} ; 변전설비비(원)
 C_u ; 발전단가(원/kWh)
 D(Q) ; 유량지속함수
 E_a ; 연간전기생산량(MWh)
 F(Q) ; 누가밀도함수
 g ; 중력가속도(m/s²)
 H ; 최대사용낙차(m), 댐높이(m)
 H_e ; 유효낙차(m)
 H_l ; 손실낙차(m)
 i_o ; 유지관리비의 상승율
 i_r ; 이자율
 i_u ; 전력판매가격 상승율
 k ; 유출계수
 L_f ; 가동율(%)
 n ; 소수력발전소의 수명(년)
 OM ; 유지관리비
 O_m ; 유지관리비율
 P_e ; 단위시간당 전기에너지양(kWh)
 P(Q) ; 확률밀도함수
 Q ; 유량(m³/s)
 Q_m ; 월평균유량(m³/s)
 Q_r ; 설계유량(m³/s)
 q ; 단위유역면적당의 월평균유량(m³/s)
 R_m ; 월강수량(mm)

W ; 유역면적의 가중치
 α ; Weibull분포의 형상계수
 β ; Weibull분포의 척도계수(m³/s)
 ρ ; 물의 밀도(kg/m³)
 η ; 소수력발전소의 효율

참 자

I ; i번째 강수량 관측소의 영향

감사의 글

본 연구는 충청북도 단양군의 발주로 한국에너지기술연구소에서 수행한 “소수력발전소 건설 타당성 기본계획 연구(1997)”의 일부임을 밝히며 관계당국에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 손병찬외, 1982, 국내소수력 자원평가 및 타당성조사 연구, 한국동력자원연구소, 연구보고서 KE-82T-12
2. 이철형외, 1992, 소수력 자원의 정밀조사 및 최적개발 분석 연구(IV), 한국에너지기술연구소, 연구보고서, KE-92029G, pp5~16
3. Robert Noyes, 1980, Small and Micro Hydro-Electric Power Plants: Technology and Feasibility, Energy Technology Review No.60, Noyes Data Corporation, U.S.A., pp163~168
4. 石崎彰, 古市正敏, 1981, 小水力 發電 讀本, オ - ム 社, pp29~33
5. 이상훈외, 1987, 중소수계의 하천유출량 추정 모델개발, 국토개발연구원, 연구보고서, pp87~89
6. Crawford. H.N. and Thurin. M.S., 1981,

- Hydrologic Estimates for Small Hydroelectric Projects, NRECA, Washington, U.S.A.
7. 차종희, 박인용, 1982, "소수력발전의 설계에 관한 연구", 대한전기협회, 조사연구논문, pp266~269
 8. 이철형, 박완순, 심명필, 1994, "소수력발전소의 수문학적 성능특성 분석", 대한토목학회논문집, 제14권, 제5호
 9. 최영박, 1977, 에너지발전공학, 운문당, 서울
 10. 박완순외, 1995, 소수력발전소의 최적운용기법 적용연구(III), 한국에너지기술연구소 연구보고서 KIER-951124, pp77~80
 11. 이철형외, 1997, 소수력발전소 건설 타당성조사 기본계획 연구, 한국에너지기술연구소, 수탁연구보고서, pp53~72
 12. 정상만외, 1997, "빈도별 홍수량에 따른 댐상류의 유출변화 분석", 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp391~396
 13. 충청북도, 1991, 한강 하천정비 기본계획

Methodology of Feasibility Assessment for Small Hydropower Plant

W. S. Park^{*}, C. H. Lee^{*}, S. M. Jeong^{**}

^{*} *Korea Institute of Energy Research*

^{**} *KJNU*

Abstract

The methodology and feasibility analysis model for small hydropower plant has been studied and developed. It consists of two main part, the performance prediction model to estimate the performance characteristics and economics analysis model to evaluate economical characteristics for surveyed sites. The performance characteristics and feasibility assessment for surveyed sites were analyzed, using developed models. Also, primary design specifications such as design flowrate, capacity, load factor were estimated and discussed for surveyed sites in Dan-yang and feasibility was suggested through analyzing the investment, unit cost and payback period.