

유출특성분석을 통한 소수력발전의 최적화

박완순*, 이철형*, 정상만**

1. 서 론

소수력발전은 다른 발전방식에 비하여 환경에 대한 영향이 거의 없는 개발 유망한 청정 에너지로 그 경제성은 발전지점의 특성, 개발형식, 설비용량 등에 따라 큰 영향을 받는다. 따라서 소수력발전의 효과적인 개발을 위해서는 이들 영향인자들에 대한 정확한 분석이 수행되어야만 한다.

Robert Noyes(1980)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(1981)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 비교적 간편한 기상 및 지형정보와 가정치만을 요구하는 방법들을 개발하여 사용하는 것이 바람직할 것이다. 본 연구에서는 미계측하천에서의 유량지속특성을 고찰하기 위해서 누적밀도함수를 사용하여 강수량 자료를 특성화하였고, 특성화된 유량지속함수를 이용하여 소수력발전소의 성능특성을 분석하고 예측할 수 있는 성능분석 모델을 개발하였다.

2. 유량지속곡선 작성 및 성능특성 해석

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

하천의 연 평균유량은 해당유역의 연 평균강수량과 지도상에서 구해지는 유역면적으로부터 다음과 같이 산정된다(차중희, 박인용, 1982).

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

만일 유출계수 k가 계절별, 월별로 변하지 않고 연중 일정한 값을 유지한다고 하면 하천의 월 평균유량은 다음과 같이 산정된다.

* 한국에너지기술연구소 유체기기연구팀

** 공주대학교 토목환경공학과 교수

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

여기서 분모의 30.42는 월간 총 일수를 나타낸다.

식(2)를 이용하여 관측소에서 측정된 월 총 강수량자료를 단위 유역면적당, 즉 유역면적 1 km² 당의 월 평균유량으로 환산할 수 있으며, 이를 이용하여 단위 유역면적당의 유량지속곡선을 작성할 수 있다. 유량지속곡선은 유량의 크기별로 누적시킨 것으로 확률분포의 누적밀도함수와 동일한 개념이기 때문에 유량지속곡선은 특정한 누적밀도함수의 형태로 표시할 수 있다.

본 연구에서는 월간 강수량자료를 단위 유역면적당의 월 평균유량 자료로 환산하여 구해진 단위 유역면적당의 유량지속곡선을 Weibull분포의 누적밀도함수를 이용하여 특성화 하였다.

2변수 Weibull분포의 확률분포함수와 누적밀도함수는 다음과 같이 표시된다.

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

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

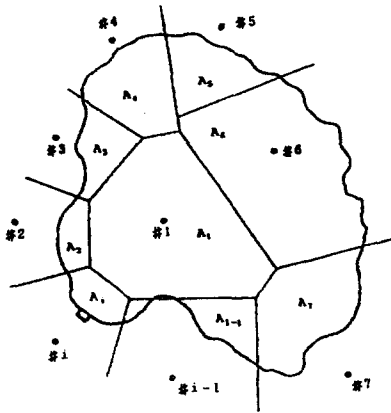


그림 1. 강수량관측소에 의해 분할된 유역면적

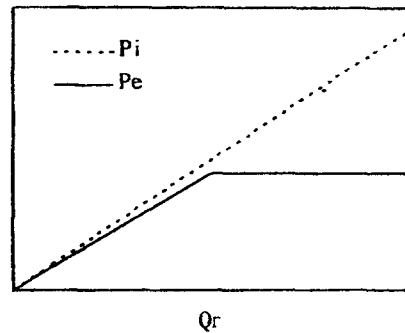


그림 2. 소수력발전소의 출력특성

소수력발전소에서의 유량은 해당 유역면적내에 여러개의 강수량관측소가 존재하므로 각각의 관측소에서 측정된 강수량자료가 유기적으로 관계되어 유량지속곡선이 작성된다. 그림 1과 같이 소수력발전소의 해당유역면적내에 i개의 강수량관측소가 존재한다면, 유역면적내에서의 평균 강수량은 Thiessen법(선우중호,1989)에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$R = \sum W_i R_i \quad , \quad W_i = A_i / A \quad \text{----- (5)}$$

여기서 A_i와 R_i는, i번째 관측소에 의해 분할된 유역면적과 강수량을 나타낸다. 소수력발전소를 통과하는 유량도 강수량과 마찬가지로 다음과 같이 표시된다.

$$Q = A \sum W_i q_i \quad \text{----- (6)}$$

따라서 소수력발전소에서의 유량에 관한 누적밀도함수와 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$F(Q) = A \sum W_i [1 - \exp \{-(q_i / \beta_i)^{\alpha_i-1}\}] \quad \text{----- (7)}$$

$$P(Q) = A \sum W_i (\alpha_i / \beta_i) (q_i / \beta_i)^{\alpha_i-1} \exp \{-(q_i / \beta_i)^{\alpha_i-1}\} \quad \text{----- (8)}$$

또한 소수력발전소에서의 유량지속곡선을 나타내는 유량지속함수는 다음과 같이 구해진다.

$$D(Q) = A \sum W_i \exp \{ -(q_i / \beta_i)^{\alpha_i - 1} \} \quad \text{----- (9)}$$

수력발전은 유량과 낙차로부터 에너지를 추출하는 발전방식으로, 그림 2는 단위낙차, 단위시간당, 단일기로 구성된 소수력발전소에 대해 유량변화에 대한 출력의 변화를 나타내는 그림이다.

소수력발전소에서 단위시간당 생산되는 평균전기에너지양 P_c 를 구하면 다음과 같다.

$$P_c = \rho g H_c \int_0^{Q_r} \eta P(Q) dQ + \rho g H_c \eta Q_r \int_{Q_r}^{\infty} P(Q) dQ \quad \text{----- (10)}$$

수차발전기의 효율은 유량 및 낙차에 따라 변할 수 있는 값이지만, 소수력발전소의 경우, 큰 변화가 없다고 가정하여 적분식 밖으로 빼내어 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_c &= \rho g H_e \eta \left\{ \int_0^{Q_r} P(Q) dQ + Q_r \int_{Q_r}^{\infty} P(Q) dQ \right\} \\ &= \rho g H_c \eta (S_1 + S_2) \quad \text{----- (11)} \end{aligned}$$

소수력발전소의 설비용량, 연 평균 가동율, 연간 전기생산량은 다음과 같다.

$$C = \rho g H_e Q_r \quad \text{----- (12)}$$

$$L_f = (S_1 + S_2) / Q_r \quad \text{----- (13)}$$

$$E_a = 8,760 C L_f \quad \text{----- (14)}$$

소수력발전소를 건설하기 위해 소요되는 비용은 정확한 설계와 많은 자료가 요구되나 본 연구에서는 중요한 몇가지 요소로 구분하여 계산하였으며, 발전단가는 다음과 같이 구해진다(이철형외,1992).

$$C_u = \left\{ \frac{i (1+i_r)^N}{(1+i_r)^N - 1} + C_i O_m \right\} \times \frac{C_c}{C \times 8,760 \times L_f} \quad \text{----- (15)}$$

3. 결과 및 검토

유출특성분석에 앞서 본연구를 통하여 개발된 유량지속곡선 산정방법의 적용가능성을 판단하였다. 그림 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. 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.

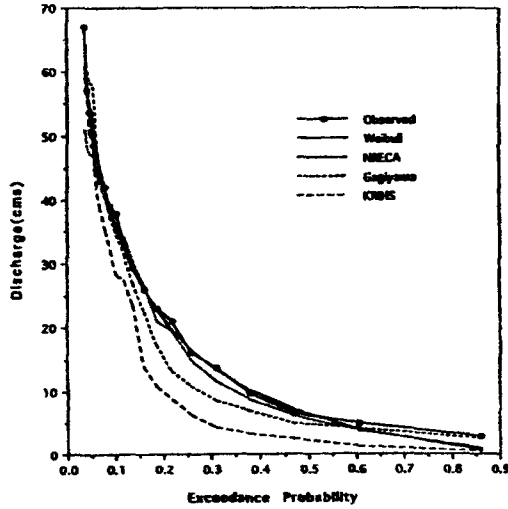


그림 3. 평창강 수력지점의 유량지속곡선

그림 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, 가자야마, KHRIS의 경우 각각 16.2, 16.5, 15.0, 10.7, 6.2m³/s 이다(이철형외,1994). 소수력개발 규모에 적합한 다른 입지에 대한 유출량 자료가 부족하여 더 이상의 비교는 어려운 점이 있으나, 그림 3의 결과로 판단할 때 본연구에서 개발된 방법이 유출량 자료가 없는 소수력개발 후보지에서의 수자원특성을 표현하는데 다른 방법에 비하여 적합하다고 할 수 있다.

본 연구에서 분석하고자하는 소수력개발 후보지는 충북 단양군 영춘면에 위치한 상리지점으로, 총 유역면적은 4820.51km² 이고, 시설용량은 소수력발전소의 허용 최대용량인 3,000kW로 설정하였다. 또한 댐축조 후 만수위에 포함되는 일부 농경지에 대하여 공시지가로 보상할 수 있는 비용을 발전소 건설비에 포함하여 경제성을 분석하였다.

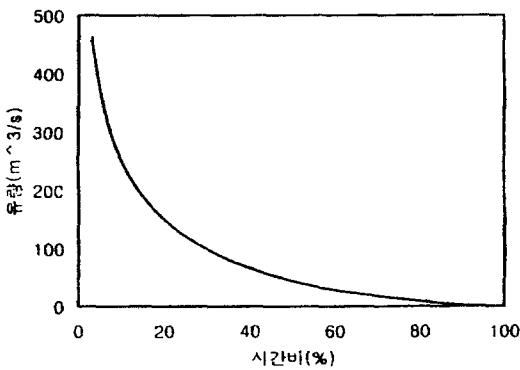


그림 4. 상리 소수력발전소 건설후보지의 유량지속곡선

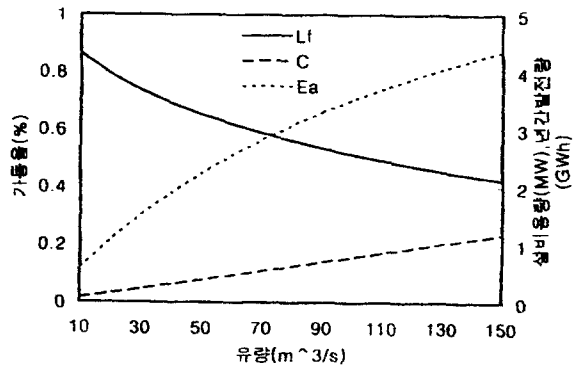


그림 5. 설계유량에 따른 시설용량, 연평균가동율 및 연간전기생산량의 변화

또한 상리 소수력 후보지 상류에 대하여 빈도해석을 통한 설계홍수량을 산정하였다(이철형 외,1997). 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 $12,815\text{m}^3/\text{s}$, $14,923\text{m}^3/\text{s}$ 으로 산정되었다.

홍수위 계산은 7개빈도에 대하여 빈도별 홍수량을 토대로 부등류 공식인 표준축차계산법을 사용하였고, 계획홍수위는 하천의 중요도 및 연안토지이용 등을 고려하여 100년과 200년 빈도 홍수위를 계산하였다.

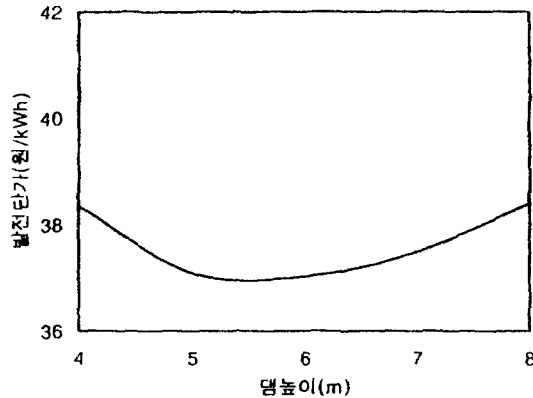


그림 6. 댐높이에 따른 발전단가의 변화

그림 6은 경제성 분석결과로서 상리 후보지점의 댐높이 변화에 따른 발전단가의 변화를 나타낸다. 본 연구에서는 소수력 발전소의 경제성을 검토하기 위해 $i_r=10\%$, $O_m=3.63\%$, $N=35$ 년, $i_u=0\%$ 그리고 유지관리비의 증가율은 0% 로 하였으며, 전력판매가격 $C_e=49.94$ 원/kWh, 소수력 발전소의 건설비는 순수한 자기자본의 투자로 가정하였다.

상리 소수력발전소 건설후보지의 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 투자비회수기간이 14년으로 나타나 경제성을 확보하는 것으로 나타났다.

4.. 결 론

하천의 상류에 위치하게 되는 대부분의 소수력발전 후보지의 경우, 유입량 등에 대한 실측자료가 부족하여 후보지에서 유량지속곡선을 작성하기가 매우어려운 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 예측모델이 개발되었다. 본 모델은 유량실측자료가 부족한 소수력발전 후보지의 최적설계가 가능하며, 이 결과를 적용함으로써 설계에 관한 신뢰성 향상과 개발여부의 판단에 효과적으로 사용될 수 있음이 밝혀졌다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 박완순, 이철형, 심명필(1997). “국내 소수력개발입지의 개발타당성 분석”, 대한토목학회 논문집, 제17권, 제II-3호
2. 박완순외(1995). 소수력발전소의 최적운용기법 적용연구(III), 한국에너지기술연구소 연구보고서 KIER-951124, pp 77-80
3. 이철형외(1997). 소수력발전소 건설 타당성조사 기본계획 연구, 한국에너지기술연구소, 수탁 연구보고서, pp 53-72
4. 이철형, 박완순, 심명필(1994). “소수력발전소의 수문학적 성능특성 분석”, 대한토목학회논문집, 제14권, 제5호
5. 이철형외(1992). 소수력 자원의 정밀조사 및 최적개발 분석 연구(IV), 한국에너지기술연구소, 연구보고서, KE-92029G, pp 5-16
6. 이상훈외(1987). 중소수계의 하천유출량 추정모델개발, 국토개발연구원, 연구보고서, pp 87-89
7. 정상만외(1997). “빈도별 홍수량에 따른 댐 상류의 유출변화 분석”, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp 391-396
8. 차종희, 박인용(1982). “소수력발전의 설계에 관한 연구”, 대한전기협회, 조사연구논문, pp 266-269
9. 선우중호(1989). 수문학, 동명사, pp53-57.
10. 건설부(1972-1992). 수문조사년보
11. 충청북도(1991). 한강 하천정비 기본계획
12. 石崎彰, 古市正敏(1981). 小水力 發電 讀本, 才 - ム 社, pp29-33
13. Robert Noyes(1980). *Small and Micro Hydro-Electric Power Plants ;Technology and Feasibility*, Energy Technology Review No.60, Noyes Data Corporation, U.S.A., pp 163-168