

월류댐을 갖는 소수력발전소의 출력특성

박완순, 이철형

1. 서 론

소수력자원은 다른 발전방식에 비하여 환경에 대한 영향이 거의 없는 개발 유망한 청정에너지로서, 최근 지구환경보호를 위한 기후협약에 대응하기 위한 에너지원으로써 재인식되고 있다. 소수력발전소는 대수력과는 달리 월류댐을 채택하기 때문에 소수력자원을 효과적으로 개발하기 위해서는 소수력발전소의 출력특성을 분석하는 것이 매우 중요하다.

소수력발전소의 초기설계 제원중 중요한 요소로는 개발입지의 지형에 영향을 받는 유효낙차와 해당구역의 수문특성에 영향을 받는 설계유량을 들 수 있다. 월류댐을 갖는 소수력발전소는 설계유량을 초과하는 유량이 유입될 경우, 댐의 상단으로 초과되는 유량을 월류시켜 일정한 출력을 유지하므로, 설계유량의 산정이 매우 중요한 설계인자가 되며, 설계유량의 산정이 소수력발전소의 성능과 경제성에 많은 영향을 미친다.

본 연구에서는 월류댐을 갖는 소수력발전소의 출력특성분석 및 설계유량 산정을 위하여, 미계측하천의 유량지속특성을 표현할 수 있는 모델과 특성화된 유량지속함수를 이용하여 소수력발전입지의 성능특성을 분석하고 예측할 수 있는 성능분석모델을 개발하였으며, 이를 이용하여 소수력발전소에서 부분부하와 정격부하를 구하는 방법과, 소수력발전소가 최대한 정격으로 가동될 수 있는 유량과 시간비를 산출하였다.

2. 소수력발전소의 출력특성

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

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

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

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

소수력발전소에서의 유량은 구역면적내에 여러개의 강수량관측소가 존재하므로 각각의 관측소에서 측정된 강수량자료가 유기적으로 관계되어 유량지속곡선이 작성된다.

(그림 1)과 같이 소수력발전소의 해당유역면적내에 i 개의 강수량 관측소가 존재한다면, 소수력발전소를 통과하는 유량은 다음과 같이 표시된다.

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

소수력발전소에서의 유량상태는 다음과 같이 2변수 Weibull분포의 누가밀도함수와 확률분포함수로 표시할 수 있다.

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

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

또한 소수력발전소에서의 유량지속곡선을 나타내는 유량지속함수는 다음과 같이 구해진다.

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

소수력발전은 유량과 낙차로부터 에너지를 추출하는 것으로 소수력발전소에서 얻을 수 있는 순수한 수력에너지는 다음과 같다.

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

(그림 2)는 단위 낙차, 단위시간당 단일기의 소수력발전소에 대한 유량변화에 따른 출력의 변화를 나타내는 그림이다. 순수한 수력에너지는 낙차가 일정할 경우 유량 변화에 따라 선형적으로 변하게 되지만 소수력발전소의 출력은 발전소의 설계유량이 존재하기 때문에 출력특성은 바뀌게 된다.

소수력발전소의 출력은 설계유량 이하에서는 유량변화에 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 월류댐 상단으로 방류하기 때문에 출력은 일정하게 유지된다.

소수력발전소를 통과하는 유량은 계절별, 월별로 다르기 때문에 순수한 수력에너지와 소수력발전소에서 발생하는 에너지는 쉽게 구할 수 없다. 이 값들을 해석적으로 구하기 위해서는 확률밀도함수를 이용하여야 한다. Weibull 확률밀도함수를 이용하여 소수력발전소에서 단위시간당 생산되는 발전량을 구하면 다음과 같다.

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

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

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

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

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

3. 결과 및 검토

본 연구에서 분석대상으로 선정한 상리지점은 남한강의 본류에 위치하고 있으며, 유

역면적은 약 5,048km², 유로연장은 약 217.3km로써, 한강 전체유역 면적(약 34,473km²)의 약 14.7%를 점하고 있으며 형상은 수지형(樹枝形)에 가깝다.

유역은 북쪽으로는 강원도 인제군, 명주군의 군계를 형성하면서 소양강 및 연곡천 유역과 접하고 동쪽으로는 태백산맥을 분수계로 영동지방과 경계를 이루며, 남쪽으로는 낙동강유역과 접하고 서쪽으로는 홍천강 및 섬강 유역과 접하고 있다. 유역의 경계는 해발 800~1,600m에 이르는 고봉으로 연립하여 분수령을 이루고 있어 지세가 험준한 편이며, 유로의 형성이 유역의 중심부를 관통하고 있어 하천연변을 따라 농경지가 분포되어 있을 뿐 대부분이 산간지로 형성되어 있다.

남한강의 수원은 강원도 평창군 진부면 동산리 오대산에서 발원하여 남류하는 오대천과 평창군 도암면 황계리에서 발원 남류하는 송천이 정선군 북평면 나전리에서 합류하여 남한강이란 명칭을 얻은 후 심한 사행을 하면서 서남류하여 영월군 영월읍에서 좌안으로 유입되는 가장 큰 지류인 평창강과 합류 후 동남으로 하류하다 좌안에서 유입되는 옥동천과 합류하면서 다시 서남으로 방향을 바꾸어 심한 사행을 계속하면서 직할하천구간에 유입된다.

(그림 3)은 상리지점에 대한 유량지속곡선이다.

(그림 4)는 상리지점에서의 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. 연간전기생산은 유량이 증가함에 따라 증가하게 되며, 유량이 점차 커지면 증가율이 서서히 둔화된다. 이러한 현상은 유량이 커짐에 따라 가동율이 점차 감소하기 때문이다.

(그림 5)는 상리지점의 설계유량에 대한 평균발전량, 소수력발전소의 부분발전량, 및 정격발전량 나타낸다. 정격발전량 설계유량을 130m³/sec로 하였을 경우, 237.3kWh로 최대가 되며, 유량지속곡선상에서의 시간비는 23.3%에 해당하는 유량이다. 이러한 사실은 시스템이 연간 85일 이상을 정격상태로 가동한다는 것을 의미한다. 또한 이 지점의 평균발전량은 단위유효낙차당 1,019kWh가 되고, 이때 가동율은 45.5%가 된다.

(그림 6)은 상리지점과 비교를 위하여 전북 남원군 대강면 사석리에 위치한 유역면적이 1,801.4km²인 중규모 유역에 대하여 분석한 것이다. 사석리 지점에서는 정격발전량은 설계유량을 50m³/sec로 하였을 경우, 114.1kWh로 최대가 되고, 유량지속곡선상에서의 시간비는 28.6%에 해당하는 유량을 나타낸다. 이러한 사실은 시스템이 연간 104일 이상을 정격상태로 가동한다는 것을 의미한다. 이 지점의 평균발전량은 단위유효낙차당 210.2kWh가 되고, 이때 가동율은 53.6%가 된다.

(그림 7)은 전북 진안군 용담면 대소리에 위치한 유역면적이 892.3km²인 유역에 대하여 분석한 것이다. 대소리 지점에서는 정격발전량은 설계유량을 25m³/sec로 하였을 경우, 51.2kWh로 최대가 되고, 유량지속곡선상에서의 시간비는 26.3%에 해당하는 유량을 나타낸다. 이러한 사실은 시스템이 연간 96일 이상을 정격상태로 가동한다는 것을 의미한다.

이 지점의 평균발전량은 단위유효낙차당 99.0kWh가 되고, 이때 가동율은 50.5%가 된다. (그림 8)은 소천 소수력발전소의 설계유량에 대한 평균발전량, 소수력발전소의 부분발전량 및 정격발전량을 나타낸다. 정격발전량은 설계유량을 14.5m³/sec로 하였을 경우, 28.5kWh로 최대가 되며, 이 때 유량지속곡선상에서의 시간비는 25.2%에 해당하는 유량이다. 이러한 사실은 시스템이 연간 92일 이상을 정격상태로 가동한다는 것을 의미한다. 이 지점의 평균발전량은 단위유효낙차당 113.7kWh가 되고, 이때 가동율은 48.22%이며, 연간 발전량은 10,805 MWh로 산정됨을 알 수 있다.

상기의 분석결과에서 알 수 있는 바와 같이 유역이 큰 상리지점과 중·소유역인 사석리, 대소리 및 소천지점의 경우, 정격발전량이 최대로 나타나는 유량은 유량지속곡선상의 시간비가 각각 23.3%, 28.6%, 26.3% 및 25.2%에 해당하는 것으로 나타났다. <표 1>은 월류패를 채택하는 소수력발전소의 경우, 정격발전량이 최대가 되는 유량이 유량지속곡선상에서 나타내는 시간비를 나타낸 것으로, 시간비는 유역의 수문특성에 따라서 달라지나 일반적으로 약 25%전후에서 결정될 수 있다는 것을 나타낸다. 따라서 소수력발전소를 효율적으로 설계 운영하기 위해서는 설비 자체가 정격으로 가동되는 시간비에 해당하는 유량과 이 때 발생하는 정격발전량의 값을 예상하는 것이 매우 중요하다.

4. 결 론

소수력발전의 출력특성은 설계유량을 중심으로 부분발전량과 정격발전량으로 구분되며, 설계유량 이하에서는 서서히 증대하나 설계유량 이상에서는 일정한 출력을 유지하게 된다. 따라서 소수력발전소를 효과적으로 개발하기 위해서는 발전설비가 정격상태로 가동되는 시간이 많게 할수록, 즉 정격발전량이 최대가 될 수 있도록 설계유량을 산정하는 것이 매우 중요하다. 소수력발전소의 출력특성을 분석한 결과, 정격발전량이 최대가 될 수 있도록 유지시켜 주는 유량은 유량지속곡선상의 시간비가 25%전후가 되며, 이는 소수력발전소의 설계유량산정에 중요한 요소가 된다는 것이 밝혀졌다.

기 호 설 명

A	; 유역면적(km ²)	P(Q)	; 확률밀도함수
C	; 소수력발전소의 설비용량(kW)	Q	; 유량(m ³ /s)
D(Q)	; 유량지속함수	Q _m	; 월평균유량(m ³ /s)
E _a	; 연간발전량(MWh)	Q _r	; 설계유량(m ³ /s)
F(Q)	; 누가밀도함수	q	; 단위유역면적당의 월평균유량(m ³ /s)
g	; 중력가속도(m/s ²)	R _m	; 월강수량(mm)
H	; 낙차(m)	W	; 유역면적의 가중치
k	; 유출계수	α	; Weibull분포의 형상계수
L _f	; 가동율(%)	β	; Weibull분포의 척도계수(m ³ /s)
P _c	; 단위시간당 발전량(kWh)	ρ	; 물의 밀도(kg/m ³)
P ₁	; 부분발전량(kWh)	η	; 소수력발전소의 효율
P ₂	; 정격발전량(kWh)		

첨자

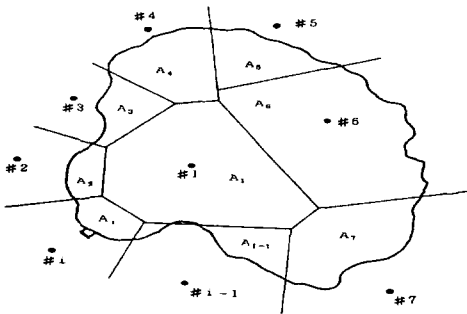
i ; i번째 강수량 관측소의 영향

감사의글

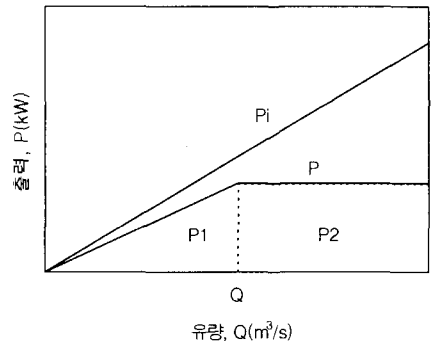
본 연구는 정부의 지역에너지사업의 일환으로 충청북도 단양군의 발주로 한국에너지기술연구소에서 수행한 "소수력발전소 건설 타당성조사 기본계획 연구(1997)"의 일부임을 밝히며 관계당국에 감사를 드립니다.

참고 문헌

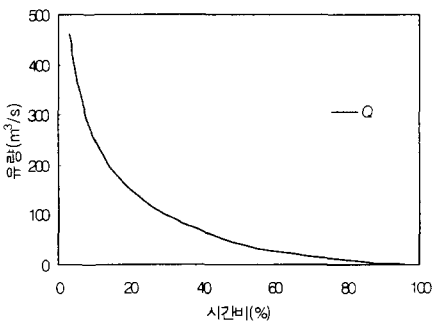
1. 차종희 외, 소수력발전의 설계에 관한 연구, 대한전기협회, 조사연구논문, 1982.
2. 이철형 외, 소수력발전소 건설 타당성조사 기본계획 연구, 한국에너지기술연구소, 연구보고서, 1997.
3. Robert Noyes, Small and Micro Hydro-Electric Power Plants ; Technology and Feasibility, Energy Technology Review No.60, Noyes Data Corporation, U.S.A., 1980.
4. 이철형, 박완순, 심명필, 국내 소수력발전입지의 개발타당성 분석, 대한토목학회논문집, 제17권, 제II-3호, 1997.
5. 이철형, 박완순, 정상만, 소수력발전소의 건설 타당성분석 기법, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 18, No. 3, 1998.



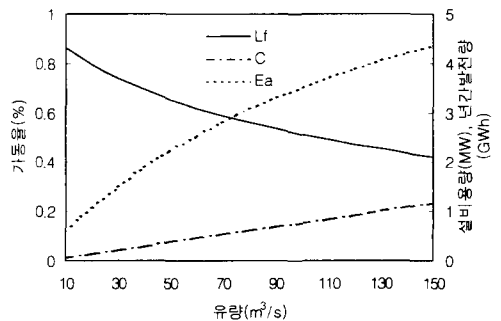
(그림 1) 강수량 관측소에 의하여 분할된 유역면적



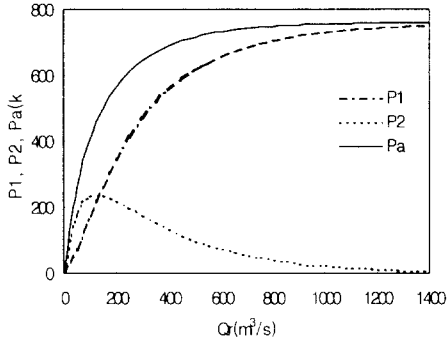
(그림2) 소수력발전소의 유량변화에 따른 출력변화



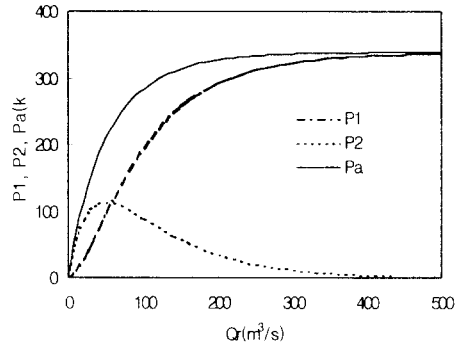
(그림 3) 상리지점의 유량지속곡선



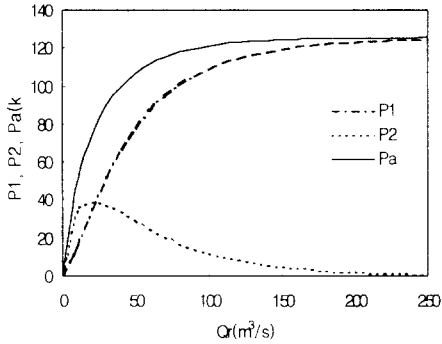
(그림 4) 유량변화에 따른 설비용량, 가동율 및 연간발전량의 변화



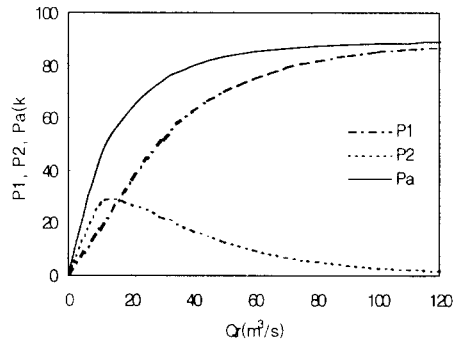
(그림 5) 설계유량에 대한 평균발전량, 부분 및 정격발전량의 관계(상리)



(그림 6) 설계유량에 대한 평균발전량, 부분 및 정격발전량의 관계(사석리)



(그림 7) 설계유량에 대한 평균발전량, 부분 및 정격발전량의 관계(대소리)



(그림 8) 설계유량에 대한 평균발전량, 부분 및 정격발전량의 관계(소천)

<표 1>소수력발전 지점별 시간비

지점명	시간비* (%)	유량** (m³/sec)	수 계
상 리	23.3	130.0	한 강
대기리	23.0	6.0	"
도둔리	23.4	21.5	"
대소리	26.3	25.0	금 강
성산리	26.3	4.0	"
장수리	25.1	12.5	"
소 천	25.2	14.5	낙동강
대야리	23.2	5.0	"
양촌리	27.2	33.5	"
사석리	28.6	50.0	섬진강
회룡리	26.1	26.0	"
용포리	26.1	9.0	"

* 유량지속곡선상의 시간비

** 정격부하 P₂가 최대로 되는 유량