

저낙차를 이용한 소수력시스템 최적설계

김승호 · 박영춘
한국수자원공사 발전사업처

Optimal Design of Small Hydro Power System Using Low Head

Kim Seung Hyo · Park Yeoung Chun
Korea Water Resources Corporation / Hydropower & Electrical Infrastructure Business Dept.

Abstract - 국내외적으로 배기가스 저감 등 환경규제 강화와 환경의식이 향상되면서 원자력, 석탄, 중유 발전 등은 주변지역의 반대에 직면하여 발전소 건설사업 추진이 순조롭지 못한 실정이다. 또한 석유에너지 자원의 고갈과 국제 고유가 시대에 따라 대체에너지의 개발에 세계 각국이 심혈을 기울이고 있다. 그러나 우리나라의 경우 대규모 수력 발전소 입지를 찾는 데는 한계가 있으며, 대부분 개발가능 지점이 15m이하 저낙차의 특징을 갖고 있다. 종래에는 소하천을 가로막아 소수력을 개발하는 것이 주종을 이루었으나, 최근에는 공사비 과다로 인한 경제성 불투명과 각종 주변지역의 민원으로 개발이 어려워 광역상수도, 하수처리장, 농업용 저수지, 다목적댐 하류 조정지댐 등에 저낙차 유훈에너지를 다각적으로 이용하는 방안이 연구개발되고 있다. 본 연구에서는 저낙차를 이용한 소수력 발전의 최적설계와 경제성 평가 기법 등을 실 적용한 사례를 중심으로 논하고자 한다.

1. 서론

대체에너지는 소수력, 태양열, 태양광, 지열, 풍력 및 해양에너지 발전 등 여러가지가 있다. 소수력을 제외한 대체에너지 기술은 많은 연구개발이 이루어지고 있지만 실용화까지 많은 어려움이 있으며, 또한 대체에너지원으로 발전한 전력판매요금이 단일가로 되어있는 현실에서 소수력을 제외하고는 초기투자비 과다와 낮은 이용률 등으로 인한 경제성 부족으로 투자를 촉진하는데 한계가 있다. 최근 지구환경 보호인식 확산에 따라 녹색의 재생에너지인 소수력 발전이 각광을 받고 있고, 소수력 기술 발전은 경제성 향상과 적용지점을 확대시켜 광역상수도, 다목적댐 하류 조정지댐, 농업용 저수지 등에 저낙차 유훈에너지를 이용한 소수력 발전소가 설계되고 있다. 우리나라에서는 1982년 "소수력개발 활성화 방안"이 공포되어 대체에너지 개발 차원으로 정부에서 건설자금과 기술개발을 지원하고 있다. 소수력 발전은 화력 및 원자력과 비교할때 환경에 대한 영향이 거의 없는 청정한 에너지로서 개발이 유망한 에너지이지만, 단위 출력당 투자비용이 다른 에너지원에 비하여 높고 대수력 발전에 비해 더 많이 소요되는 것으로 알려져 있다. 그러나 소수력 발전은 발전지점의 특성, 개발형식 및 설비용량 등에 따라 경제성이 크게 좌우되므로 이에 대한 정확한 분석이 수행된다면 반드시 소수력 발전의 경제성이 낮다고 할 수는 없다. 특히 소수력 발전소의 설비용량은 발전소의 투자단가, 발전원가 및 가동률 등 경제성에 커다란 영향을 미치며, 이는 지형 및 유량지속특성에 의해 결정된다. 따라서 개발후보지 선정은 소수력 발전소 건설에 앞서서 세심한 분석이 요구되는 사항이다. 본 연구에서는 기존 다목적댐 하류 조정지댐의 저낙차 유훈에너지를 이용한 소수력 발전소 설계와 경제성 평가기법 등을 실 적용한 사례를 들어 제시코자 한다.

2. 댐 운영현황

2.1 안동댐

안동댐은 낙동강 유역내의 수자원을 그 지역 특성에 맞도록 개발하여 하류지역에 관개용수 및 생·공용수를 공급하는 동시에 홍수조절을 목적으로 하고 있으며, 5시간 침투발전을 한후 임하댐과 연계하여 역조정지댐에서 계획공급량을 방류하고 필요시는 양수하는 것을 원칙으로 운영 되도록 설계되어있다. 24개년 연평균 유입량은 31.07m³/s, 발전 방류량은 34.12m³/s로 조사 되었다.

2.2 역조정지댐

역조정지댐은 안동 다목적댐 약 3km 직하류에 위치하며 안동댐 발전을 재저축하여 양수발전을 합과 동시에 낙동강하류 하천유지용수 및 생·공용수, 농업용수 등을 일정하게 방류 할 수 있는 기능을 담당하고있다. 그 규모는 총 저수용량 500만m³, 유효저수량 300만m³을 갖고 있으며, 상시만수위 EL. 98.0m, 저수위 EL. 95.0m로 월별 저수량중 최고수위는 EL. 97.92m, 최저수위는 EL. 92.24m, 평균수위는 EL. 95.74m로 나타났다.

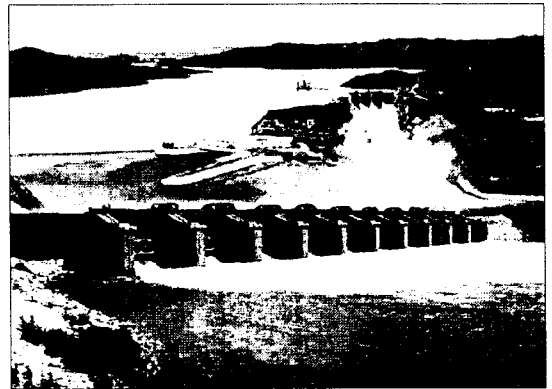


그림 1. 안동 본댐 및 역조정지댐

3. 소수력 규모 검토

3.1 용수공급 계획 및 실적

안동댐 기본계획 당시 댐하류 용수공급량은 29.4m³/s(926백만m³/년)를 공급하도록 계획되어 있다. 일최고 방류량은 본댐 유입량과 같이 716.20m³/s, 24개년(8,760일)간 무방류량은 982일(11%)을 기록했으며, 무방류중 '92년 임하댐 준공이전 무방류가 761일로 전체 무방류 비율의 77%를 차지하였다. 안동댐과 임하댐 연계운영에 따라 임하댐 건설 전에는 용수공급 계획량보다 양수발전에 많은 비중을 차지하였으며, 역조정지댐 하류 방류량은 24개년 평균 31.56m³/s, 최근 11개년 평균 33.36m³/s로 조사 되었다.

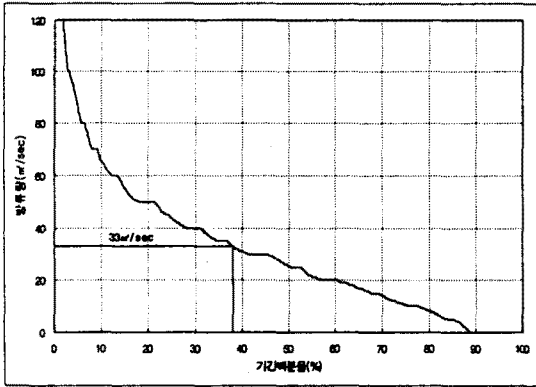


그림 2. 방류량에 따른 시간 백분율

3.2 사용수량 결정

사용수량은 안동댐 준공이후 24개년간 평균 방류량 31.56m³/s보다 안동댐과 임하댐 연계, 장래 용수수요 증가 등을 고려한 11개년간 평균 방류량 약 33m³/s로 결정하는 것이 바람직하다. 따라서, 발전 사용수량중 갈수기(10월~익년 4월)는 계획공급량 19.9~22.0m³/s 보다 많은 33.0m³/s를 공급하고, 풍수기(5월~9월)는 하류 용수공급 목표에 차질이 없도록 계획공급량(33.7~50.2m³/s)을 공급하는 것으로 결정하였다.

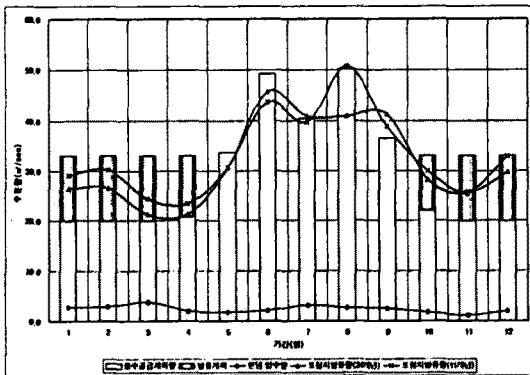


그림 3. 역조정지댐 방류량

3.3 유효낙차 결정

소수력 발전소의 설비용량은 발전소의 물리적 특성인 낙차와 설계유량에 의해 결정된다. 낙차란 물이 수차발전기에 도달하기까지의 수직거리를 말하며, 수차발전기에 유용한 에너지를 주는 낙차를 유효낙차라 한다. 수력에 의한 전력은 물의 높은 위치에너지를 수차에서 기계적 에너지로 변환, 발전기를 운전하는 것으로 다음식과 같이 발전전력을 계산할 수 있다.

$$P = 9.8QH\eta_c \quad (\text{kW}) \quad \dots \dots (1)$$

여기서, Q : 유량(m³/s), H : 유효낙차(m)
 $\eta_{c,r}$: 수차발전기 종합효율

설계수위는 양수검용 발전소의 적정운영과 효율적 발전에 지장을 초래하지 않는 범위에서 EL. 95.00m로 결정하였다. 방수위가 EL. 89.5m인 점을 감안하면 이용수심은 H=5.5m이며 손실수두 0.3m를 제외하면 유효낙차는 5.2m로 산정할 수 있다. 또한 하류 약 1.5km 부근의 조약돌 정리시 유효낙차가 6.6m로 증가되나 교량의 안정성 등을 고려 현재 자연조건을 변형시키지 않는 것으로 하였다.

3.4 발전기 용량 및 발전량 산정

발전설비 용량은 역조정지댐 실정에 적합하고 효율적인 발전 전력을 생산할 수 있는 시설규모를 선정하기 위해 방수위 표고 EL. 89.5m에서 모의운영을 실시하였다. 방류량을 저수지 유입량으로 정의하고, 저수지 용량 곡선, 발전 사용수량등의 대개변수를 미 공병단의 HEC-5 Program에 적용한 결과 11개년간 현 방수위를 고려한 적정 시설용량 1,500kW에서 연간발전량은 9.8GWh로 산정되었다.

4. 소수력 설계

4.1 수차형식 선정

소수력 발전소의 수차형식을 결정하기 위해서는 우선적으로 유효낙차, 수차출력 및 발전 사용수량 등을 종합적으로 검토하여 현지역건에 부합한 최적의 형식을 결정하여야 한다. 수차형식은 Pelton, Francis, Propeller중 유량 및 낙차조건에 따라 표준화된 수차모델, 제작회사 등의 선정도를 비교 검토한 결과 본 발전소에 사용가능한 수차의 형식은 Propeller 수차이며, Propeller 수차중 15m이하의 저낙차에서 효율이 높고 토공굴착이 적어 공사비 면에서 경제적인 Tublar 수차를 선정 하였다.

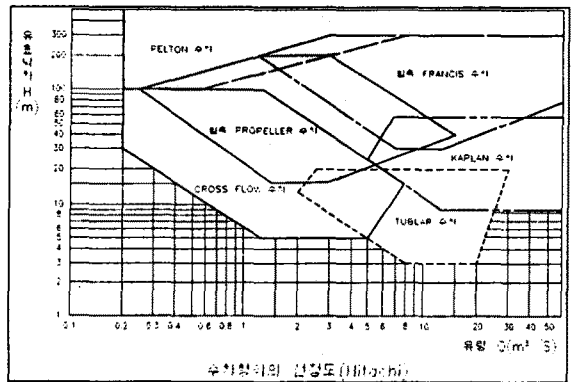


그림 4. 수차형식 선정도

4.2 수차대수 결정

수차대수는 일반적으로 발전소 건설비와 유지관리 보수상의 문제점 등을 고려하여 가급적 동일용량의 수차로 계획하였다. 안동 소수력은 낙차 및 사용수량의 변화 특성을 감안 대용량 수차 기종을 채택시 효율 및 발전량 생산이 적게 나타났으며, Draft Tube 등의 규모가 커져서 토공굴착에 따른 공사비 측면에서도 불리하였다. 따라서, 수차발전기 기종 및 규모에 따른 건설공사비 및 경제성 평가 등을 종합적으로 비교 검토한 결과 대용량 1~2대보다는 500kW 3기가 유리한 것으로 판단 되었다.

4.3 발전기형식 선정

소수력용으로 적용되고 있는 발전기는 동기발전기와 유도발전기가 있으며, 최근에는 유도발전기의 사용이 두드러지고 있다. 유도발전기는 발생한 전압, 주파수가 병렬로 연계된 전력계통과 일치하게 되며 조절기능이 없어 여자장치, 동기투입장치 등이 필요한 동기발전기보다 구조가 간단하여 설치공사 및 유지보수 측면에서 매우 경제적이거나 계통의 역을을 저하시키는 단점이 있다. 본 발전소 발전기의 형식은 구조적인 면, 운전의 안전성 및 경제성 등을 고려시 유도발전기가 적절하며, 그 중 회전자를 동기속도 이상으로 회전시켜 발전하는 농형이 권선형에 비하여 구조적으로 견고하므로 농형 유도발전기로 계획하였다.

4.4 발전기 단자전압

발전기 최적 단자전압은 전기자권선의 병렬회로수와 관계가 있으며 일반적으로 병렬회로수는 극수(POLE)의 약수가 되어야 한다. 병렬회로당 전류는 경제성을 고려하여 최소 1500A ~ 최대 2800A 정도가 한도이다. 발전기는 전압이 높을수록 코일의 절연이 두껍게 되며 도체의 점적율이 저하하여 중량이 늘어나고 고가가 된다. 반면, 용량에 비해 전압을 낮추면 고정자 코일의 감긴 횟수가 감소하여 설계상의 자유도가 없어 제작이 어려우며, 변압기까지의 모선 및 개폐설비의 용량 등을 고려하면 저전압 대전류는 비경제적인 면이 많다. 그러나, 지금까지의 내용은 대규모 발전소 발전기 단자전압을 결정하기 위한 이론적 접근 방법으로 소규모 발전설비에 적용하기는 적절치 않고, 아래 표 1과 같은 접근 방법을 통하여 단자전압을 결정하는 것이 기기의 COST-DOWN과 향후 유지보수에 유리하다고 판단 되었다. 국내에는 소수력 발전에 사용되는 수차발전기의 표준화 작업이 이루어지지 않아 일본 자료 및 제조사 규격을 통하여 수차발전기 적정 단자전압 선정에 참고하였다.

표 1. 수차발전기 적정 단자전압

구 분	용 량	사용전압(V)
일본 신에너지 재단	5,000kW 초과	6,600
	5,000kW 이하	3,300
일본 Fuji 전기	500 ~ 5,000kW	3,300 & 6,600
	500kW 이하	400
	250kW 이하	200

위의 표 1을 참조 유도발전기 500kW의 적정전압은 380V로 판단할 수 있다. 그러나 단자전압이 380V일 경우 변압기에 이르는 정격전류(3,039A)와 단락전류(약 60kA)의 크기에 따른 모선 및 개폐설비 용량 등이 커져 제작이 어렵고, 비경제적이므로 수차발전기 500kW의 단자전압은 3.3kV로 선정하였다.

4.5 비속도(Ns)에 의한 수차선형

발전소에 적용할 수차를 선정하는 데는 유효낙차를 고려하여야 하며, 발전량과 유효낙차가 결정되면 비속도(Ns)를 구할 수 있으며 이에 의해 수차의 회전수(N)를 구한다. 이때 수차의 회전수를 높게 구하면 발전기가 적어지고 효율이 좋아지며, 수차발전기의 소형화를 이끌수 있어 구조물과 건물 또한 줄일 수 있으므로 경제적이 된다. 따라서 가능한 한 높은 비속도의 수차를 선정하여 실제 수차의 회전수를 높이는 것이 바람직하므로 이에 따라 비속도(Ns)에 의해 적절한 수차형식을 결정한다. Pelton 수차는 Ns가 적어 250m이상의 고낙차에 유리하고, Francis 수차는 50~500m의 광범위한 낙차범위에서 적용할 수 있으며, 본 발전소와 같이 저낙차에 가장 적합한 것은 Propeller 수차로 비속도가 높고 효율이 좋아 저낙차 지점에 최적의 조건을 만족한다. 아래와 같이 Propeller 수차의 비속도 계산식에 의해 시산 비속도(Trial Specific Speed)를 산출하여 수차형식별 비속도(Ns)의 범위표와 비교한 결과 본 발전소는 Propeller Tublar 수차가 적합한 것으로 판단되었다.

$$N_s \leq \frac{20,000}{H+20} \text{ [m-kW]} < \text{J.E.C} > \dots \dots (2)$$

$$794 \leq \frac{20,000}{5.2+20} \text{ [m-kW]}$$

표 2. 수차형식별 비속도(Ns)의 범위(단위 m-kW)

Standard Type	A · H	JEC	U.S.B.R	W · P
Pelton	10 ~ 70	12 ~ 23		13 ~ 65
Francis	57 ~ 325	70 ~ 320	57 ~ 380	75 ~ 350
Deriaz	125 ~ 400	140 ~ 370		
Kaplan (Propeller)	250 ~ 745	250 ~ 580	260 ~ 1,140	270 ~ 1,000
Tublar	555 ~ 990			

또한 고정날개(Fixed Blade)형 Propeller 수차는 구조가 간단하고 경제적이며, Runner 날개를 분해할 수 있으므로 유지관리가 용이하다는 것을 알 수 있었다.

4.6 소수력 발전소 구성

소수력 발전소 설치 위치는 안동댐 직하류 역조정지댐생·공용수, 농업용수 및 하천유지용수의 균등 방류량을 이용 댐 우안부에 수압철관을 설치 수차를 입축형식으로 배치하도록 설계하였다. 발전된 전력의 송전은 인근 22.9kV 배전선로에 연결토록 하였으며, 그 구성도는 그림 5와 같다.

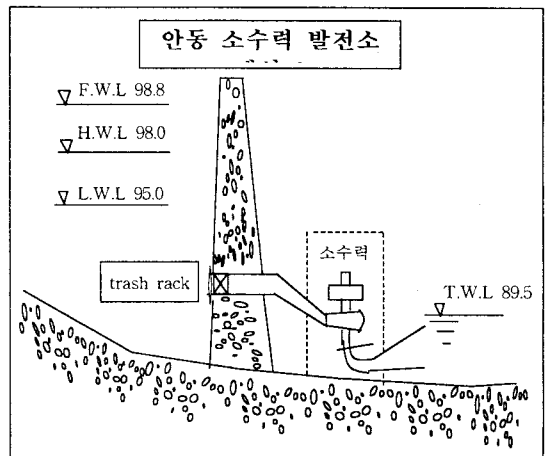


그림 5. 안동 소수력발전소 구성도

5. 발전 제어시스템

5.1 운영 방안

안동댐 주발전소의 중앙집중식 분산처리형 감시제어 시스템에서 소수력설비 전반을 감시제어 할 수 있는 무인 시스템을 구성함으로써 경제성, 효율성 향상을 도모 하였다. 또한 계통의 원활한 운영을 방해하지 않을 것을 최우선으로 하여 계통이나 발전소 사고시 즉시 계통과 분리하여 사고확대를 방지하였다.

5.2 제어시스템 구성

본 시스템의 목적을 달성하기 위해 본댐 주발전소 중앙조정실에 Operation Station 및 Engineering Station을 두어 소수력 전 설비를 감시제어하며, 소수력 발전소에 RTU(Remote Terminal Unit)를 설치하여 소수력설비의 자동운전이 가능하고 원격제어가 가능하도록 그림 6과 같이 구성하였다.

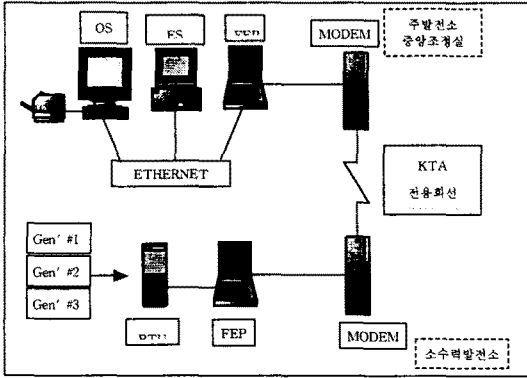


그림 6. 발전제어시스템 구성도

발전제어 시스템은 기존 주발전소의 운영 인력을 활용하여 발전기를 자동으로 기동·정지 함으로서 추가인력이 소요되지 않도록 약 4km 상류 본댐 주발전소의 중앙조정실에 설치하여 연간경비를 줄일 수 있었다.

6. 경제성 평가

6.1 고정비용 결정

소수력 발전사업과 같은 장기 투자사업은 미래의 상황을 현재의 시점에서 분석해야 하므로 불확실한 요소를 많이 포함하게 된다. 그러나 소수력 자원과 소수력 개발을 위한 투자비가 한정된 상태에서 투자의 효용성을 극대화하기 위해서는 사업의 기술적, 경제적 타당성을 분석하는 일이 매우 중요하다. 그동안 발전원가 산정 및 경제성 평가시 고정비용 비율을 대규모 수력설비와 같이 댐 시설기준에서 제시한 총사업비의 3.32%를 일반적으로 사용하였으나, 본 연구에서는 실질적인 법인세 적용과 제세, 보험료, 운전유지 및 수선비를 무인운영과 소규모 설비용량인점을 감안 1.0%로 적용하였다.

6.2 발전원가 계산

발전원가는 투자 및 소요되는 총비용에 대한 종합원가를 구하는 것으로 투자자금에 대한 이자율을 8%로 가정 내용년수 30년 동안에 소요되는 전체비용을 현가화하여 연간발전량으로 나누어 계산하였다.

$$\text{발전원가} = \frac{\text{년간경비}}{\text{년간발전량}} \text{ (원/kWh)} \dots (3)$$

여기서, 연간경비 : 연간투자자본회수비 + 연간운전유지비
 연간투자회수비 : 총 자본회수비 × CRF

$$\text{자본회수계수(CRF)} = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

6.3 경제성 평가

경제성 평가는 발전소 운영기간동안 총 투자비용에 대하여 얻어지는 총 수익의 흐름으로 판단하게 된다. 여기서 총 투자비용은 초기 건설기간 동안의 이자율을 고려한 초기 건설비와 매년 발전소 운영에 소요되는 유지관리비를 합하여 산정하였고, 총 수익은 전력판매단가에 연간발전량을 곱하여 산정하였다. 경제성평가의 방법은 사업별 순현재가(net present value, NPV) 방법과 경제적 내부수익율(economic internal rate of return, EIRR) 방법으로 구분 검토 하였으며, 검토결과 비용편익비(B/C)는 1.0을 상회하였고, 경제적내부수익율(EIRR)은 순현재가가 영(zero)인 경우의 할인율로서 할인율 8.0%보다 높게 나타나 소수력 개발의 타당성은 좋은 것으로 판단되었다.

7. 결 론

저낙차 유희에너지를 소수력으로 개발시 발전지점의 특성, 개발형식 및 설비규모의 적정성 확보시 경제성이 우수하고, 유도발전기를 채용함으로써 기동정지가 간단하고 유지관리가 용이함을 실증적으로 알 수 있었다. 농업용 저수지 및 광역상수도가 계속 증가하고 있어 저낙차 유희에너지를 이용한 소수력 개발은 지속적으로 추진되어야 할 것으로 판단되며, 그동안 소수력개발 가부 결정에 중요한 경제성 평가시 적용한 고정비용 비율을 소수력 규모 및 특성 등을 감안 적정하게 산정 제시하여 향후 소수력 개발에 활용토록 하였다. 소수력 발전소의 경제성은 공사비와 생산된 전력의 판매단가에 크게 좌우되므로 국내 천연 부존자원을 최대한 활용하고 계속 증가하는 전력소모를 충당하기 위해서는 전력판매단가 상향조정, 국산품 개발로 공사비 절감, 융자금 금리인하 및 상환기간 연장 등 정부의 지속적 지원이 요구된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국동력자원연구소, "소수력자원의 정밀조사 및 최적개발 분석연구(VI)", 1984
- [2] 한국수자원공사, "수력개발을 위한 타당성조사 기준", 1986
- [3] 한국수자원공사, "안동 다목적댐 최종 기술보고서", 1977
- [4] 千秋信一, "發電水力演習", 學獻社, 1975