

소수력 발전을 위한 농업용 저수지의 적지 선정 평가

우 재 열

(wjy0@paran.com)

한국농어촌공사 사업계획실

■ 서 론

최근 화석연료의 고갈로 인한 에너지 시장의 불확실성과 온실가스 감축의무의 본격화로 인하여 저탄소 녹색성장사업의 재생에너지 부분인 농업용저수지의 소수력발전에 대한 관심이 높아지고 있다. 우리나라의 에너지 자원은 97% 이상 해외에서 수입하고 있다. 수력발전 에너지는 전력생산량의 1.4%, 발전설비 구성별 용량의 8.4%에 불과하지만 공급 및 가격의 안전성인 장점을 가지고 있는 재생 가능한 순국산 에너지이고, 이산화탄소(CO₂)를 배출시키지 않는 깨끗한 에너지이다.

우리나라의 소규모 수력 개발은 산과 계곡이 많은 지역적 특성을 이용하여 저수지나 소하천을 이용한 발전방식이 주종을 이루었다. 판매단가가 낮으며 수량의 계절적 편중에 따른 연중 지속적인 발전불가로 가동률이 20~40% 정도에 그치고 있어 낮은 경제성으로 인해 소수력 개발이 원활하게 이루어지지 않았다. 그러나 최근 전력구매가격의 지속적인 상승과 소수력은 지구 온난화의 주범인 이산화

탄소 배출량이 거의 없는 환경친화적이고 재생가능한 자원이라는 점에서 더욱 중요성이 크고 개발할 가치가 있는 것으로 평가되고 있다. 또한, 2012년부터 발전사업자들에게 전체 발전량의 일정 비율을 신·재생에너지 전력으로 공급하도록 의무화하는 신·재생에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standard, RPS)가 도입되는 것으로 계획되어 있다. 현재 약 2.0%인 신·재생에너지 발전비율은 2022년까지 총발전량의 10%로 높여야 하므로 신·재생에너지 개발에 대한 관심이 더욱 더 높아지고 있다. 신·재생에너지 의무할당제 도입에 따른 신·재생에너지의 수요증가와 전력판매가격 변화로 인하여 소수력의 경제성 분석에 대한 중요성이 증가될 것으로 판단된다. 우리나라에서 비교적 규모가 크며, 수자원의 활용가치가 있다고 판단되는 유효저수량 100만㎡ 이상인 농업용 저수지는 2008년 현재 전국 17,611개중 440개로 전체의 약 2.5%에 불과한 실정이다(농림수산식품부·한국농어촌공사, 2009). 이렇게 수자원 활용측면에서 매우 취약한 구조를 가지고 있으나, 미래의 에너지원으로서의 수력발전사업에

향후 효과적인 추진을 위해서는 경제성 분석에 필수적인 저수지 발전량의 정확한 예측이 필요하다. 발전량 추정관련 연구로는 박완순·이철형(1994)은 소수력 발전소의 수문학적 성능 특성 등 수문자료와 지형자료를 이용한 설계제원 등의 성능 특성 분석 기법을 제시하였다. 안태진 등(1999)은 기존 농업용 댐에서의 관개용수를 근거로 저수지 발전모의 운영 및 비선형계획 모형을 적용하여 부존 수력발전량을 추정하였다. 송광석(2004)은 저수지 모의운영을 통한 발전량과 발전인자들과의 관계를 통한 발전량 추정공식이 제시된 바 있으나, 분석기간을 1년으로 하여 신뢰성 확보가 어려운 점이 있다. 또한, 개발가치가 있는 소수력 지구의 선정은 소수력 발전량으로부터 얻어지는 편익과 소수력 발전 설치비용을 고려한 경제성분석을 기초로 결정되고 있다. 최근 일정규모 이상의 농업용 저수지에 소수력 발전 개발이 시도되고 있으나, 발전량과 발전소 설치비용의 추정이 어려워 경제성 있는 지구선정에 어려움이 있는 실정이다. 경제성 분석에 의한 소수력 개발 타당성 분석과 최적규모 결정방안과 관련된 연구로서 국내에서는 박완순 등(1997)이 국내에 산재한 소수력발전입지에 대상으로 성능특성 및 경제성을 분석하였으며, 발전단가 및 투자비회수기간 등의 경제성을 평가하여 소수력 발전 입지의 개발 타당성을 제시하였다.

김건영(2001)은 소수력발전소가 설치된 대아 및 경천지구를 모델로 수문학적 제반 특성 및 발전소 운용 관련 자료를 분석하여 농업용 저수지를 소수력 발전에 효과적으로 이용하기 위한 최적안을 제시하였다. 김길호 등(2007)은 소수력 경제성 분석을 위한 발전량 및 발전소 설치비용 추정에 있어 대상 지구에 대한 발전량으로부터 편익·비용비를 산정하였다.

국외에서는 Anagnostopoulos와 Papantonis(2007)는 수로식 소수력 발전소에서 터빈의 수와 용량의

변화가 최적규모 결정을 위한 경제성에 미치는 영향을 분석하였다. Bockman 등(2008)은 소수력발전 계획에 있어 전력가격의 변화를 고려한 투자시기와 시설규모에 대하여 연구하였다. Santolin 등(2011)은 소수력발전소의 최적규모 결정을 위하여 터빈형식, 터빈크기, 연간에너지공급계획, 건설비용, 순현재가, 내부할인을 등을 고려하여 기술적, 경제적 분석을 수행하였다. 국내외에서 소수력발전의 경제성분석을 통한 최적규모 결정에 대한 연구가 진행되어 왔으나, 대부분 기존 저수지나 댐을 대상으로 경제성 분석을 통하여 최적의 설계유량과 시설규모를 결정하는 방법을 제시하고 있어, 경제성 있는 저수지를 선정하고 소수력 개발의 우선순위를 결정하는 데에는 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 저수지의 발전인자(관개면적, 유역면적, 유효저수량, 총낙차)가 소수력의 발전량에 미치는 영향을 파악하고, 발전인자로부터 소수력의 발전량을 예측할 수 있는 회귀식을 제시하고자 한다. 또한, 편익·비용비(B/C)를 유역면적, 총낙차, 가동률 및 전력기준단가로 나타내는 회귀식을 도출하고, 이러한 인자의 변화가 편익·비용비에 미치는 영향을 파악하고 경제성 있는 저수지의 제원을 제시함으로써 타당성 조사단계에서 소수력 개발 우선순위를 결정하는 데에 의사결정 자료를 제공하고 자 한다.

■ 연구방법

▶ 대상 저수지

대상저수지로는 준공된 소수력 발전 저수지의 규모와 농업용저수지 소수력 개발 계획을 고려하여, 수문기상 및 지형특성이 유사한 충청남북도내 저수지중 소수력 개발이 가능하다고 판단되는 일정규모

(유효저수량 3백만 m^3 , 총낙차 5m)이상의 저수지 21개를 선정하였다. 소수력발전은 물의 흐름을 이용하여 발전기를 회전시켜 발전하는 방식으로, 물의 위치에너지를 전기에너지로 변환시켜 발전하고 있다. 따라서, 소수력발전은 발전에 필요한 물의 양이 중력에 의하여 낙하 할 때 발생하는 전기에너지로 소수력 발전량은 물리적 특성인 낙차와 유량에 의해서 결정된다. 본 논문에서는 소수력발전에 가장 영향을 미치는 발전인자로 총낙차, 유입량에 영향을 미치는 유역면적, 필요수량에 영향을 미치는 관

개면적, 발전에 사용 가능한 유량인 유효저수량 등을 선정하였다. 대상저수지의 유효저수량은 예산군 예당저수지에서 최대값 46백만 m^3 이었으며, 대전시 방동저수지에서 최소값 3백만 m^3 이었다. 대상 저수지의 총낙차는 보은군 보청저수지에서 최대값 28.6m, 예산군의 예당저수지에서 최소값 8.0m를 나타냈다(표 1). 대상저수지의 관할 9개 기상대(기상관측소)의 최근 30개년(1979년~2008년)의 연평균강수량은 1,287mm이며 평균오차백분율은 3.74%로 나타났으며, 발전인자에 관한 자료는 한국농어촌공사의

표 1. 대상저수지의 발전인자 및 연발전량

구분	저수지	위치		관개면적 (ha)	유역면적 (km^2)	유효저수량 (천 m^3)	총낙차 (m)	설계유량 (m^3/s)	연발전량 (MWh)
		도별	시군						
1	백곡	충북	진천군	2,613.5	84.79	21,504	17.10	3.80	1,618.3
2	미호	충북	진천군	2,499.8	133.30	13,853	15.00	5.50	2,069.9
3	원남	충북	진천군	852.1	36.55	8,690	18.70	1.26	616.3
4	비룡	충북	보은군	707.6	38.52	5,902	18.26	1.30	679.3
5	용당	충북	충주시	927	28.73	4,423	11.00	0.90	227.0
6	보청	충북	보은군	985.6	22.71	4,333	28.60	0.95	633.7
7	추평	충북	충주시	488.0	16.10	3,808	15.00	0.50	170.2
8	방동	충남	대전	226.2	13.75	3,015	15.70	0.45	130.8
9	용암	충남	연기군	477.5	16.20	4,143	13.50	0.50	156.6
10	계룡	충남	공주시	450.2	15.74	3,412	12.00	0.52	152.1
11	탑정	충남	논산시	5,713.3	218.80	30,490	12.30	9.00	3,538.4
12	반산	충남	부여군	765.1	17.40	5,400	8.60	0.54	103.9
13	서부	충남	서천군	1,627.0	30.39	7,348	11.16	0.90	211.4
14	동부	충남	서천군	2,477.0	28.34	10,733	8.50	0.49	70.3
15	청천	충남	보령시	3,145.3	70.10	20,639	17.00	2.50	982.0
16	예당	충남	예산군	6,917.4	373.60	46,070	8.00	13.50	3,867.7
17	산수	충남	서산시	638.9	17.06	3,316	16.00	0.54	183.3
18	고풍	충남	서산시	1,293.8	25.90	7,192	19.40	0.90	351.5
19	가혜	충남	아산시	592.8	15.88	3,474	9.75	0.60	130.8
20	도고	충남	아산시	840.9	20.97	4,278	9.30	0.65	127.6
21	궁평	충남	아산시	1,108.0	43.33	6,673	12.20	1.55	467.0

농업기반시설등록부를 이용하였다.

▶ 연발전량 산정

농업용저수지의 연발전량을 산정하기 위해서는 먼저 저수지의 방류량 유황곡선을 얻어야 한다. 방류량은 식 (1)과 같은 저수지 모의 운영식을 통해 얻었다.

$$R_t + Q_t = S_{t-1} - S_t + I_t + P_t - E_t \quad (1)$$

여기서, R_t : 통관 방류량, Q_t : 여수로 방류량, S_t , S_{t-1} : t , $t-1$ 일의 저수량, I_t : 유입량, P_t : 수면강수량, E_t : 수면증발량

저수지 모의운영 프로그램은 한국농어촌공사에서 농촌용수개발사업 등에 보편적으로 사용하고 있는 HOMWRS(Hydrological Operation Model for Water Resources System)을 사용하였다. 최근 10년간(1999~2008년)의 수문자료를 HOMWRS에 입력하여 방류량을 산정하였고, 국내 소수력 설계에서 많이 사용되는 풍수량(방류량 유황곡선에서 26%에 해당되는 유량 값)을 설계유량으로 결정(농업기반공사·현대건설주식회사, 2000; 우재열·김진수, 2010)하였다(그림 1).

저수지의 단위시간 발전량은 식 (2)와 같이 설계유량을 이용하여 결정한다.

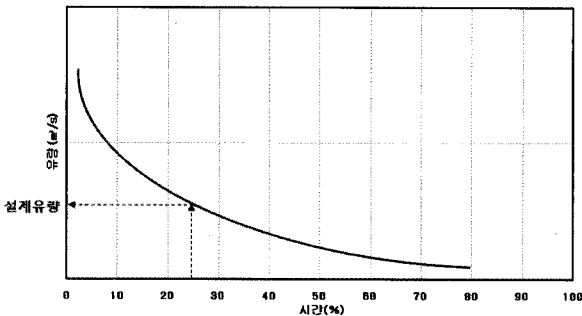


그림 1. 설계유량의 결정

$$P_h = 9.8 \times Q_d \times H_e \times n_s \quad (2)$$

여기서, P_h : 단위시간 발전량(kWh), Q_d : 설계유량(m^3/s), H_e : 유효낙차(m), n_s : 시스템효율(%)

유효낙차는 총낙차(만수위-사수위)에서 손실수두를 뺀 값으로 총낙차의 90%로, 시스템효율은 85%로 가정하였다. 저수지별 연발전량은 단위시간 발전량에서 일발전량을 산정한 후 365일 자료를 합산하여 산정하였다.

식 (2)의 단위시간 발전량을 이용하여 계산된 일발전량은 식 (3), 일별발전량을 합산한 연발전량은 식 (4), 10년간의 연평균발전량은 식 (5)로 표현할 수 있다. 연발전량은 단위시간발전량을 합산한 10년간의 연평균발전량 적용하였다.

$$P_d = 24 \times P_h \quad (3)$$

$$P_a = \sum_{d=1}^{365} P_d \quad (4)$$

$$\bar{P} = \sum_{a=1}^{10} P_a / 10 \quad (5)$$

여기서, P_d : 일발전량(kWh), P_h : 단위시간 발전량(kWh), P_a : 연발전량(kWh), \bar{P} : 연평균발전량(kWh)

▶ 편익·비용비 (B/C)의 산정

버몬트 지역은 스마트성장 원칙을 받아들여 개발을 위한 10가지 고려사항을 설정하였다. 이 원칙들은 지역사회가 중심이 되어 커뮤니티의 미래에 대한 계획을 수립한 것으로, 공공부문과 지역사회 주민이 공동으로 계획을 수립하여, 지역계획과 개발에 신중히 적용하고 있다. 이 10가지 고려사항 중 공간계획과 관련한 원칙 1과 원칙 3을 소개한다.

$$B_c = P_s \times \frac{C_o}{1,000} \quad (6)$$

여기서, B_c : 연편익(백만원), P_s : 연발전량(MWh), C_o : 전력기준단가(원/kWh)

전력기준단가는 변동요금인 전력거래소 계통한계 가격(System Marginal Price)으로 거래되고 있어, 최근 3개년(2008~2010년) 평균 계통한계가격인 113.89원/kWh를 적용하였다. 편익의 현재가치총계는 전력기준단가 상승률을 고려한 경우, 식 (7)과 같이 표시할 수 있고, 소수력 개발에 따른 비용은 건설비용과 유지관리비용으로 구성된다.

본 연구에서는 준공된 농업용저수지의 소수력발전 지구에 대한 건설비용을 시설용량, 유역면적 및 총 낙차의 함수로 표시하였다. 또한, 유지관리비는 건설비용에 유지관리비율 2.3%(한국농촌공사, 2006; 우재열 등, 2011)을 곱한 값으로 하였다.

비용의 현재가치총계는 소수력 건설기간 및 유지관리비용 상승률을 고려하여 식 (8)으로 표시할 수 있다.

$$B_g = \sum_{t=1}^n \frac{B_c(1+i_c)^{t-1}}{(1+r)^t} \quad (7)$$

$$C_g = \sum_{k=1}^n \frac{C_k K_k}{(1+r)^k} + \sum_{t=1}^n \frac{C_m(1+i_m)^{t-1}}{(1+r)^t} \quad (8)$$

여기서, B_g : 편익의 현재가치 총액(백만원), C_g : 비용의 현재가치 총액(백만원), B_c : 연편익(백만원), C_c : 건설비용(백만원), r : 할인율(%), t : 시설물의 내용연수, C_m : 유지관리비용(백만원), k : 공사기간, K : 건설비용 백분율(%), i_c : 전력기준단가 상승률(%), i_m : 유지관리비용 상승률(%)

할인율로는 농업부문 투자사업 타당성분석 종합보고서(한국농어촌공사, 2010)와 한국농어촌공사 자체사업 업무추진 메뉴얼(한국농촌공사, 2006)에서 제시한 5.5%를 적용하였으며, 내용연수로는 30년을 채택하였다.

건설비용은 소수력발전 지구여건에 따라 편차가 크게 발생되어 객관적으로 추정하기에 많은 어려움이 있다. 여기서는 신·재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS제도와 연계방안(산업자원부, 2006)에서 사용된 시설용량으로 건설비용을 추정하는 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 준공된 9개 농업용 저수지 소수력발전지구의 사례를 이용하여 공사기간 및 투입비용 비율을 결정하였으며, 공사기간은 가장 빈도가 높은 3년으로 하고, 건설비용의 분포 비율은 표 2와 같은 값을 채택하였다.

소수력 발전사업 초기에 건설된 지구는 상대적으로 건설비용이 높게 나타나고 있어 준공년도 차이로 발생하는 물가상승률은 고려하지 않았다.

표 2. 건설기간 분포 비율

건설기간	1	2	3
백분율(%)	4	52	44

따라서, 편익·비용비는 식 (9)로 표시된다.

$$\frac{B}{C} = \frac{B_g}{C_g} \quad (9)$$

■ 결과 및 고찰

▶ 연발전량

대상저수지를 대상으로 추정된 연발전량은 평균 892MWh이었으며, 예산군 예당저수지에서 최대값 3,868MWh이었으며, 서산시 동부저수지에서 최소값 70MWh이었다(표 1).

▶ 편익과 비용의 산정

표 3. 발전인자에 대한 연발전량의 단계별 중회귀식

Step	중회귀식	P 값		R _u
		I _a	0.22	
Step 1	P _a =0.22I _a +10.19W _a -0.01A _s +37.78G _h -582.58	W _a	<0.001	0.91095
		A _s	0.65	
		G _h	<0.05	
		W _a	<0.001	
Step 2	P _a =12.57W _a +35.68G _h -478.86	G _h	<0.05	0.91607
		W _a	<0.001	
Step 3	P _a =12.10W _a +54.53	W _a	<0.001	0.89549

P_a: 연발전량(MWh), I_a: 관개면적(ha), W_a: 유역면적(km²), A_s: 유효저수량 (천 m³), G_h: 총낙차(m)

가. 편익의 산정

연발전량(P_a)을 발전인자인 관개면적(I_a), 유역면적(W_a), 유효저수량(A_s), 총낙차(G_h)를 독립변수로 하여 추정한 단계별 중회귀식은 표 3과 같다.

분석분석표(ANOVA)에 의하면 유의한 F값이 < 0.001을 보여, 회귀식이 유의성이 인정되는 것으로 나타났다. 그러나, 독립변수 사이에 상관관계가 클 경우에 중회귀식에서는 다중공선성(Multicollinearity)이 발생하여 오류가 있을 수 있다. 독립변수의 P값(위험률)이 높은 경우는 다중공선성으로 독립변수에 포함된 오차가 클 가능성이 높으므로 독립변수의 P값이 0.05 이상인 경우에는 P값이 높은 독립변수를 제거하여 단계별 회귀식을 유도하였다.

여러 회귀식 중 최적의 회귀식을 판단하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 식 (10)과 같은 독립함수 선택기준(R_u)(上田 등, 2004)을 판별식으로 선정하여 이 값이 최대인 경우를 최적의 식으로 판단하였다.

$$R_u = 1 - (1 - R^2) \frac{n+k+1}{n-k-1} \quad (10)$$

여기서 R²은 결정계수, n은 샘플수, k는 자유도를 나타낸다.

표 2에서는 Step 2의 식에서 R_u가 최대값을 보여 이를 최적의 회귀식으로 판별하였다.

따라서, 연발전량은 식 (11)로 표현되고, 식 (11)을 식 (6)에 대입하여 연편익식 (12)을 얻었다.

$$P_a = 12.57W_a + 35.68G_h - 478.86 \quad (11)$$

$$B_c = (0.01257W_a + 0.03568G_h - 0.47886) \times C_c \quad (12)$$

여기서, P_a: 연발전량 (MWh), W_a: 유역면적 (km²), G_h: 총낙차 (m), B_c: 연편익(백만원), C_c: 전력기준가격 (원/kWh)

식 (12)에 의하면 연편익은 유역면적, 총낙차 및 전력기준가격에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

나. 비용의 산정

2010년 현재 준공된 농업용저수지의 소수력발전지구 9지구에 대한 제원 및 건설비용은 표 4와 같다. 총낙차는 12.3~42.6m, 유역면적은 40.3~218.8km²를 보였다. 건설비용은 시설용량이 320kWh인 탐정저수지에서 14억원으로 최소값을 나타냈고, 시설용량이 1,220kWh인 장성저수지에서 36억원으로 최대값을 나타냈다.

소수력발전지구 9지구에서의 건설비용(C_c)을 종속

표 4. 소수력 발전소 설치 저수지의 제원 및 건설비용

구분	저수지	위치	시설용량 (kWh)	유역면적 (km ²)	총낙차 (m)	건설비용 (백만원)	준공 연도
1	동화	장수군	1,000	58.80	42.60	2,095	2005
2	하동	하동군	825	58.50	37.60	2,618	2007
3	담양	담양군	1,274	65.60	33.50	2,913	2006
4	장성	장성군	1,220	122.80	22.50	3,595	2007
5	백곡	진천군	430	84.79	17.10	1,904	2007
6	울현	산청군	560	40.30	30.10	2,019	2009
7	경천	완주군	440	97.65	16.80	1,822	2008
8	탐정	논산시	320	218.80	12.30	1,439	2010
9	청천	보령시	490	70.10	17.00	1,499	2010

변수, 시설용량(I_c), 유역면적(W_a), 총낙차(G_h)를 독립 변수로 하여 이들의 관계를 중회귀식은 표 5와 같다.

독립변수의 P값(위험률)이 0.05 이상인 독립변수를 제거, 독립함수 선택기준(R_u)이 높은 Step 2의 회귀식을 최적의 식으로 채택하였다. 따라서, 건설비용은 식 (13)으로 표현되고, 연발전량은 식 (14)과 같이 시설용량과 가동률의 함수로 표시(한국농촌공사, 2006)되어 시설용량은 식 (15)과 같이 표시된다. 그러므로 건설비용은 식 (16)으로 표시되며, 식 (11)을 식 (16)에 대입하면 식 (17)과 같이 유역면적, 총낙차 및 가동률의 함수로 나타낼 수 있다. 또한, 유지관리비용은 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다(한국농촌공사, 2006).

$$C_c = 1.71I_c + 963.55 \quad (13)$$

$$C_c = \frac{I_c \times O_r \times 8,760}{1,000} \quad (14)$$

$$I_c = \frac{P_a}{(8.76 \times O_r)} \quad (15)$$

$$C_c = 0.195 \frac{P_a}{O_r} + 963.55 \quad (16)$$

$$C_c = \frac{(2.45W_a + 6.96G_h - 93.38)}{O_r} + 963.55 \quad (17)$$

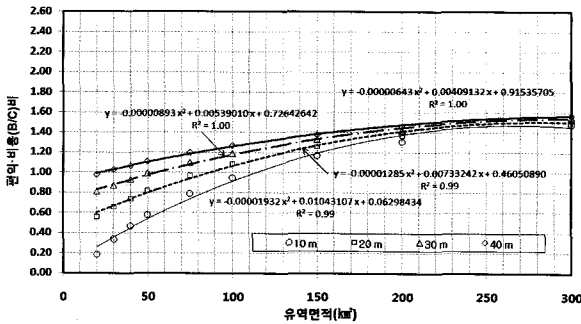
$$C_m = 0.023C_c \quad (18)$$

여기서, C_c : 건설비용(백만원), P_a : 연발전량(MWh),

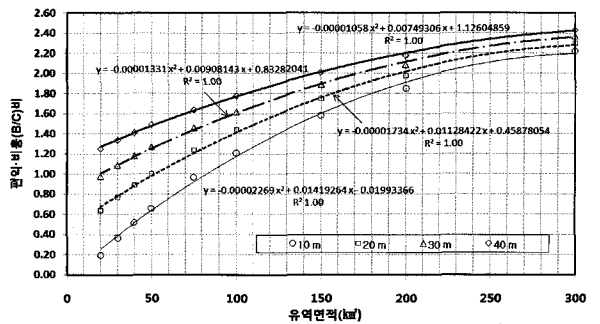
표 5. 건설비용의 단계별 중회귀식

Step	중회귀식	P 값		R_u
		I_c	W_a	
Step 1	$C_c = 2.07I_c - 0.74W_a - 20.1G_h + 1,2833.13$	I_c	<0.01	0.51666
		W_a	0.835	
		G_h	0.385	
Step 2	$C_c = 1.71I_c + 963.55$	I_c	<0.01	0.64266

C_c : 건설비용(백만원), I_c : 시설용량(kW), W_a : 유역면적(km²), G_h : 총낙차(m)



(a) 가동률 25%



(b) 가동률 45%

그림 2. 총낙차의 변화가 편익·비용비에 미치는 영향

I_c : 시설용량(kW), O_f : 가동률(%), W_a : 유역면적(km^2), G_h : 총낙차(m), C_m : 유지관리비용(백만원)
 식 (17) 및 (18)에 의하면 건설 및 유지관리비용은 유역면적 및 총낙차의 증가에 따라 증가하고, 가동률의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

편익·비용비 추정공식은 대상지역의 연평균 강수량이 1,287mm로 우리나라의 연평균 강수량과 흡사하여 여러 곳에서 범용적으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

40m 이하에 따른 편익·비용비(B/C)는 그림 2와 같다. 이때 전력기준단가는 2008~2010년 평균 SMP 가격인 113.89원/kWh을 적용하였다.

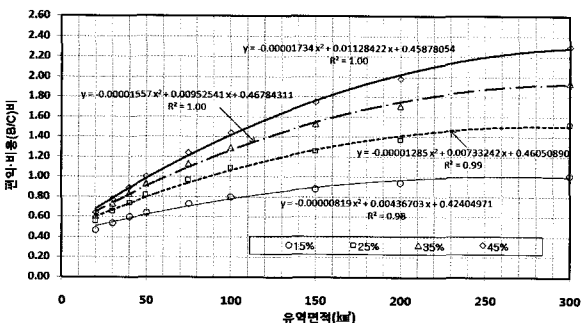
편익·비용비는 유역면적과 총낙차가 클수록 크게 나타났고, 유역면적이 클수록 총낙차에 의한 영향은 작게 나타났다. 가동률이 작은 경우(25%)가 큰 경우(45%)보다 이런 경향은 크게 나타났다. 가동률이 같은 경우, 편익·비용비가 1.0이 되는 유역면적은 총낙차가 클수록 작아지는 것으로 나타났다.

▶ 발전인자(유역면적, 총낙차)의 변화에 대한 경제성분석

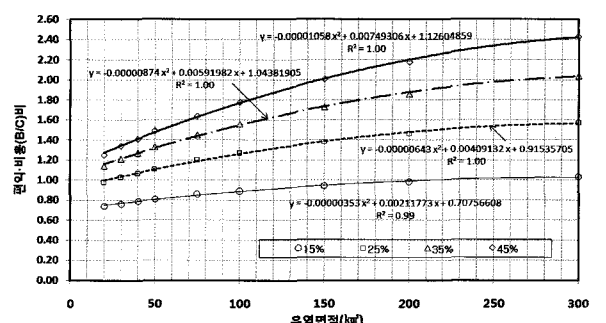
발전인자의 변화(유역면적 300 km^2 이하, 총낙차

▶ 가동률에 변화에 대한 경제성분석

가동률의 변화(15, 25, 35, 45%)에 따른 편익·비용비(B/C)는 그림 3과 같다. 여기서 전력기준단가는



(a) 총낙차 = 20m



(b) 총낙차 = 40m

그림 3. 가동률의 변화가 편익·비용비에 미치는 영향

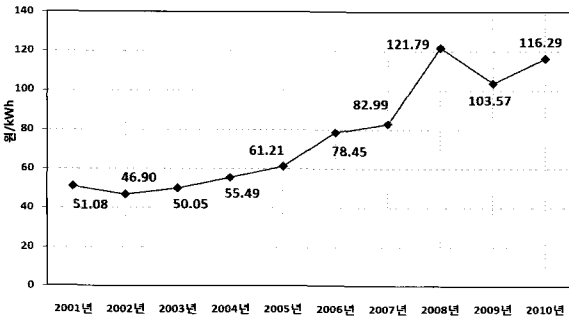


그림 4. 연도별 계통한계가격

113.89 원/kWh를 적용하였다.

편익·비용비는 유역면적이 클수록 가동률에 의한 영향이 크게 나타났으나, 총낙차가 큰 경우(40m)에는 유역면적보다는 가동률에 의한 영향이 더 크게 나타났다.

가동률이 15%인 경우 유역면적 200km² 이하에서는 편익·비용비가 항상 1.0 이하로 되어 경제성이 없는 것으로 나타났다. 총낙차 20m인 경우 편익·비용비가 1.0이 되는 유역면적은 가동률 25%에서 87 km², 가동률 45%에서 52km²을 보여 가동률이 클수록 유역면적은 작아지는 것으로 나타났다.

가동률은 소수력 발전의 편익·비용비에서 가장 영향을 미치는 중요한 요소로서 관개기에만 가동되는 농업용저수지(약 25%)보다 연중 가동되는 다목적댐의 경우(45% 이상)가 높은 것으로 조사되었다

(산업자원부, 2006). 따라서 가동률의 제고를 위해서는 연중 가동될 수 있는 득높임 사업지구 저수지를 우선 개발하는 것이 효과적이라고 판단된다.

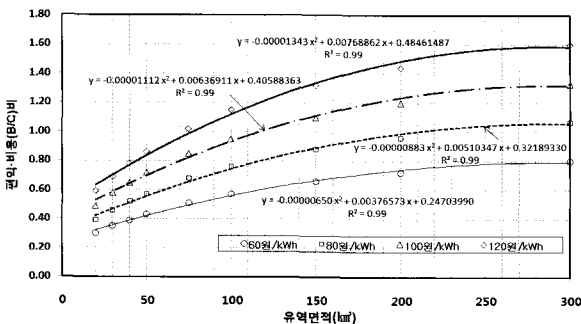
▶ 전력기준단가 변화에 대한 경제성분석

전력기준단가는 한국전력거래소의 외부 에너지 가격변동에 의하여 결정되어 변동성이 크나, 점진적으로 상승하는 추세에 있으며 계통한계가격은 2008년 약 122원/kWh의 최대값을 보였다(그림 4).

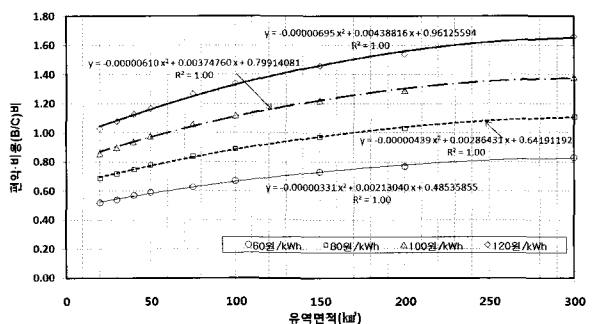
전력기준단가의 변화에 따른 편익·비용비는 그림 5와 같다. 이 때, 가동률은 25%를 적용하였다.

편익·비용비는 유역면적이 클수록 전력기준단가에 의한 영향이 크게 나타났다. 총낙차가 큰 경우에는 유역면적보다는 전력기준단가에 의한 영향이 더 크게 나타났으며, 전력기준단가는 소수력발전의 경제성에서 가장 중요한 요소의 하나로서 전력기준단가가 60원/kWh인 경우에는 유역면적 및 총낙차에 관계없이 편익·비용비는 항상 1.0 이하로 되어 경제성이 없는 것으로 나타났다.

총낙차가 20m인 경우, 편익·비용비가 1.0이 되는 유역면적은 전력기준단가 100원/kWh에서 117km², 120원/kWh에서 78km²을 보여, 전력기준단가가 상승하면 유역면적이 작은 경우에도 경제성을 갖는 것



(a) 총낙차 = 20m



(b) 총낙차 = 40m

그림 5. 전력기준단가의 변화가 편익·비용비에 미치는 영향

으로 나타났다.

최근의 최고 전력기준단가 120원/kWh, 총낙차 20m를 적용한 경우 편익·비용비가 1.0이 되는 유역면적은 가동률 25%의 농업용 저수지에서는 78km², 가동률 45%의 농업용 저수지(예, 득높임 저수지)에서는 47km²로 나타나 그 이하의 유역면적을 갖는 저수지에서의 소수력 개발은 경제성이 없다고 판단된다.

▶ 대상저수지에의 적용

편익 비용비 식 (9)에 대상저수지의 유역면적, 총

낙차, 전력기준단가 및 가동률을 적용한 결과는 표 6과 같다. 이때 전력기준단가는 113.89원/kWh, 가동률은 25%를 적용하였다.

대상저수지의 편익·비용비는 0.07~1.56으로 나타났다. 21개 대상저수지 중 3개 저수지(미호, 탐정 및 예당)가 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

준공되어 가동 중인 저수지(백곡, 탐정 및 청천)의 편익·비용비는 0.89~1.37으로 1.0 전후로 나타났다. 또한, 소수력 개발을 추진 중인 미호저수지와 예당저수지의 편익·비용비는 각각 1.16과 1.56으로 경제성이 있는 것으로 나타났다.

표 6. 대상저수지의 소수력발전에 대한 편익·비용비

구분	저수지	위치	유역면적 (km ²)	총낙차 (m)	B/C	비고
1	백곡	진천군	84.79	17.10	0.98	준공
2	미호	진천군	133.30	15.00	1.16	계획
3	원남	진천군	36.55	18.70	0.68	
4	비룡	보은군	38.52	18.26	0.69	
5	용당	충주시	28.73	11.00	0.36	
6	보청	보은군	22.71	28.60	0.80	
7	추평	충주시	16.10	15.00	0.34	
8	방동	대전	13.75	15.70	0.34	
9	용암	연기군	16.20	13.50	0.29	
10	계룡	공주시	15.74	12.00	0.21	
11	탐정	논산시	218.80	12.30	1.37	준공
12	반산	부여군	17.40	8.60	0.07	
13	서부	서천군	30.39	11.16	0.39	
14	동부	서천군	28.34	8.50	0.25	
15	청천	보령시	70.10	17.00	0.89	준공
16	예당	예산군	373.60	8.00	1.56	계획
17	산수	서산시	17.06	16.00	0.40	
18	고풍	서산시	25.90	19.40	0.60	
19	가혜	아산시	15.88	9.75	0.10	
20	도고	아산시	20.97	9.30	0.17	
21	궁평	아산시	43.33	12.20	0.57	

가동률 25%인 경우, 전력기준단가 150원/kWh이 되었을 때는 대상저수지 중 편익·비용비가 1.0 이상이 되는 저수지는 6개 저수지(백곡, 미호, 보청, 탑정, 청천 및 예당)로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 전력기준단가 113.89원/kWh인 경우, 가동률이 45%로 되었을 때 편익·비용비가 1.0 이상이 되는 저수지는 5개 저수지(백곡, 미호, 탑정, 청천 및 예당)로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 향후 전력 기준단가 및 가동률은 증가할 가능성을 내재하고 있어 경제성 있는 저수지는 증가할 것으로 기대된다.

▶ 경제성 있는 총낙차와 유역면적의 관계

편익·비용비 식 (6)에 대상저수지의 제원을 참고 하여 전력기준단가 113.89원/kWh, 가동률 25%와 45%를 적용한 경우, 저수지의 소수력에서 편익·비용비가 1.0이 되는 총낙차와 유역면적의 관계는 표 7, 그림 6과 같다.

편익·비용비가 1.0이 되는 직선은 총낙차가 증가하면 유역면적은 감소하는 것으로 나타났다. 총낙차 10m인 경우 가동률 25%에서 유역면적 110km², 가동률 45%에서 유역면적 78km², 총낙차 30m인 경우 가동률 25%에서 유역면적 52km², 가동률 45%에서 유역면적 22km²로 나타났다. 일반적으로 가동률이 10% 증가하면 경제성 있는 유역면적은 약 15km² 감소하는

효과가 있는 것으로 나타났다.

■ 결 론

본 논문에서는 충청남북도에 위치한 유효저수량 300만m³이상의 농업용저수지를 대상으로 발전인자(관개면적, 유역면적, 유효저수량, 총낙차)가 소수력 발전에 미치는 영향을 파악하고, 연발전량 추정 공식을 제시하였다. 또한, 경제성분석을 통하여 소수력 발전의 편익·비용비(B/C)에 유역면적, 총낙차, 가동률 및 전력기준단가가 미치는 영향을 평가하고 경제성 있는 저수지의 제원을 제시하였다. 여기서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 발전인자로 연발전량을 추정할 수 있는 다수의 중회귀식이 유도되었고, 이중 최적의 추정식은 유역면적 및 총낙차의 함수로 표현되었다. 한편, 간편식은 유역면적만으로 연발전량을 간편하게 산정할 수가 있는 장점을 가지고 있다.
2. 편익·비용비는 유역면적과 총낙차가 클수록 크게 나타났다. 유역면적이 클수록 총낙차에 의한 영향은 작게 나타났으나, 가동률이 작은 경우가 큰 경우보다 이런 경향은 크게 나타났다.
3. 편익·비용비는 유역면적이 클수록 가동률에 의한 영향이 크게 나타났으나, 총낙차가 큰 경우에는

표 7. 편익·비용비가 1.0이 되는 총낙차와 유역면적의 관계

총낙차(m)	유역면적(km ²)	
	가동률 25%	가동률 45%
5	124	92
10	110	78
15	95	64
20	80	50
25	66	36
30	52	22

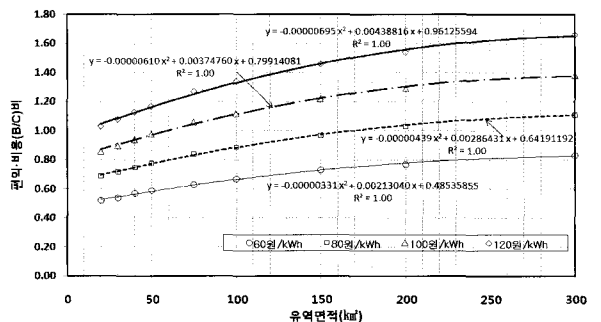


그림 6. 편익·비용비가 1.0이 되는 총낙차와 유역면적의 관계

유역면적보다는 가동률에 의한 영향이 크게 나타났다.

4. 편익·비용비는 유역면적이 클수록 전력기준단가에 의한 영향이 크게 나타났으나, 총낙차가 큰 경우에는 유역면적보다는 전력기준단가에 의한 영향이 크게 나타났다.

5. 가동률 및 전력기준단가는 소수력 경제성 분석에서 가장 중요한 요소로서, 가동률이 15% 이하인 경우에는 유역면적 200km² 이하에서, 전력기준단가가 60원/kWh인 경우에는 유역면적 및 총낙차에 관계없이 항상 1.0 이하로 되어 소수력발전은 경제성이 없는 것으로 나타났다.

6. 유도된 편익·비용비의 함수식을 대상저수지에 적용한 결과, 21개 대상저수지 중 3개 저수지(미호, 탑정 및 예당)가 경제성이 있는 것으로 분석되었고, 특히 소수력 개발을 추진 중인 미호 및 예당저수지의 편익·비용비는 모두 1.0 이상으로 경제성이 있는 것으로 나타났다. 향후, 전력기준단가 및 가동률은 상승할 가능성을 내재하고 있어 경제성 있는 저수지는 증가할 것으로 예상된다.

7. 편익·비용비 식에 대상 저수지의 제원을 참고하여 전력기준단가 113.89원/kWh, 가동률 25%와 45%를 적용한 경우, 편익·비용비가 1.0이 되는 총낙차와 유역면적의 관계는 총낙차 10m인 경우 가동률 25%에서 유역면적 110km², 가동률 45%에서 유역면적 78km², 총낙차 30m인 경우 가동률 25%에서 유역면적 52km², 가동률 45%에서 유역면적 22km²로 나타났다. 일반적으로 가동률이 10% 증가하면 경제성 있는 유역면적은 약 15km² 감소하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 도출된 연발전량 추정공식 및 농업용저수지의 유역면적, 총낙차, 가동률 및 전력기준단가의 변화에 따른 경제성분석 및 경제성 있는 농업용 저수지 제원의 제시는 타당성 조사단계에서 소수력 개발 우선순위를 선정하는 데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 김건영, 2001, 농업용 저수지의 소수력발전이용에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 김길호·이충성·이진희·심명필, 2007, "경제성분석에 의한 소수력 개발의 최적규모 결정 방안," 한국수자원학회논문집, 40(12), pp.995~1007.
3. 농림수산식품부·한국농촌공사, 2009, 농업생산기반정비 사업통계연보.
4. 농업기반공사·현대건설주식회사, 2000, 동화지구 소수력발전 개발사업 실시설계 보고서.
5. 박완순·이철형, 1994, "소수력발전소의 수문학적 성능 특성분석," 대한토목학회논문집, pp.1159~1166.
6. 박완순·이철형·심명필, 1997, "국내 소수력발전입지의 개발타당성 분석," 대한토목학회논문집, 17(3), pp.197~205.
7. 산업자원부, 2006, 신·재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS제도와 연계방안, 2004-N-PS04-P-04.
8. 송광석, 2004, 농업용 저수지의 소수력 부존량 조사, 한경대학교 대학원 석사학위 논문.
9. 안태진·류희정·박정웅, 1999, "최적화기법을 이용한 기존 농업용저수지에서의 부존 수력발전량 추정," 대한토목학회논문집, 32(3), pp.281~289.
10. 우재열·김진수, 2010, "농업용저수지를 이용한 소수력의 연간발전량 추정," 한국농공학회논문집, 52(6), pp.1~7.
11. 우재열·김진수·장훈·김영현, 2011, "농업용저수지의 소수력 개발을 위한 경제성 분석," 한국농공학회논문집, 53(2), pp.53~60.
12. 한국농촌공사, 2006, 자체사업 업무추진 매뉴얼.
13. 한국농어촌공사, 2010, 농업부문 투자사업 타당성분석 종합보고서.
14. Anagnostopoulos, J. S., and Papantonis, D. E., 2007, "Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant," Energy Conversion and Management, 48(10), pp.2663~2670.
15. Bockman, T., Fleten, S. E., Juliussen, E., Langhammer, H. J., and Revdal, I., 2008, "Investment timing and optimal capacity choice for small hydropower projects," European Journal of Operational Research, 190(1), pp.255~267.
16. Santolin, A., Cavazzini, G., Pavesi, G., Ardzizon, G., and Rossetti, A., 2011, "Techno-economical method for the capacity sizing of a small hydropower plan," Energy Conversion and Management, 52(7), pp.2533~2541.
17. 上田太一郎, 小林真紀, 淵上美喜(2004), Excelで学ぶ回帰分析入門, Ohmsha.