

# 경제성분석에 의한 소수력 개발의 최적규모 결정 방안

## Framework for Optimum Scale Determination for Small Hydropower Development Using Economic Analysis

김길호\* / 이충성\*\* / 이진희\*\*\* / 심명필\*\*\*\*

Kim, Kil Ho / Yi, Choong Sung / Lee, Jin Hee / Shim, Myung Pil

### Abstract

This study presents a framework for optimum scale determination for small hydropower development in a river basin. The framework includes the construction of hydrology and topography data, the simulation of hydropower operation, the economic analysis, and the determination of optimum scale of the small hydropower. The optimum scale of design flow and facility are determined by Net Present Value among economic analysis indices. The investment cost is estimated by the cost function derived from the construction cost of existing small hydropower plants. The benefit from power generation is estimated by the price announced by government. The presented framework is applied to the two potential sites in Cho River basin for the dam and run-of-river type of plants. Finally, the sensitivity analysis for a design flow and scale of the plant is performed for the each site. The usage of the framework presented in the study is highly expected for the estimation of potential hydropower resources or the decision support tool for a proprietor by estimating the optimum scale and economical feasibility in advance.

**keywords** : small hydropower, optimum scale, economic analysis

### 요 지

본 연구에서는 하천유역에서 소수력 개발 대상지점에서의 최적규모를 결정하는 방안을 제시하였다. 제시된 방안은 지형 및 수문자료의 구축, 발전소 모의운영, 경제성분석, 최적규모 결정과 같은 일련의 절차로 이루어진다. 최적규모 결정을 위해 경제성 평가지표 가운데 하나인 순현재가를 이용하였고, 이를 통해 최적 설계유량과 시설물의 최적규모를 도출하였다. 초기비용의 산출을 위하여 기존 소수력발전소의 비용 자료를 검토하여 함수식을 개발하였고, 편익 산정시 현재 공사된 전력 기준단가를 이용하였다. 이러한 일련의 절차를 기존에 조사된 금강수계의 초강유역에 위치한 댐식, 수로식 소수력 지점 2개소에 적용하였으며, 최종적으로 설계유량과 시설물의 규모 변화에 따른 NPV 민감도를 확인하여 최적규모를 결정하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 소수력 개발지점에서의 최적규모 및 경제성 여부를 사업추진 이전에 개략 추정하여 잠재수력 부존량을 확인함으로써 사업시행주체의 의사결정 지원 측면에서 활용도가 높을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 소수력, 최적규모, 경제성분석

\* 인하대학교 사회기반시스템공학부 석사과정

MS Candidate, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: pravda5419@paran.com)

\*\* 인하대학교 수자원시스템연구소 선임연구원

Senior Researcher, Inst. of Water Resources System, Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: sung@inha.ac.kr)

\*\*\* 인하대학교 환경토목공학부 연구교수

Research Prof., Inst. of Water Resources System, Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: jinheelee@inha.ac.kr)

\*\*\*\* 인하대학교 환경토목공학부 교수

Prof., Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: shim@inha.ac.kr)

## 1. 서론

최근 화석연료의 고갈로 인한 에너지 시장의 불안정과 온실가스 감축 의무의 본격화로 인해 차세대 에너지의 대안으로서 소수력을 비롯한 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 국제적으로 소수력(Small HydroPower, SHP)에 대한 통일된 정의는 없지만 우리나라의 경우, 『대체에너지개발 및 이용보급촉진법시행규칙』(2003.1.3)에서 ‘물의 유동에너지를 이용하여 발전하는 시설용량 10,000kW 이하의 수력발전’으로 규정하고 있다. 소수력은 기존시설물의 이용여부에 따라 ‘하천유역에서의 소수력’과 농업용저수지, 정수장, 다목적댐 등에 부착하는 방식인 ‘기존시설물을 이용한 소수력’으로 구분할 수 있으며(산업자원부, 2006), 하천유역에서의 소수력은 개발형식에 따라 크게 댐식(dam type)과 수로식(run-of-river type)으로 구분할 수 있다. 국내 현재 운영되고 있는 하천유역에서의 소수력은 금강, 봉화, 방우리 등을 비롯한 14여개의 발전소가 있다(한국수자원공사, 2007).

일반하천에서의 소수력 개발 계획은 크게 입지분석(location analysis)과 적지분석(site suitability analysis)으로 구분할 수 있는데, 본 연구는 하천유역에서의 소수력 개발을 위한 적지분석 과정에서 개발 최적규모를 결정하는 방안 도출을 목적으로 한다. 최적규모의 결정은 지형분석, 유황분석, 발전소 모의운영, 경제성분석의 단계로 이루어지는데, 지형분석과 유황분석은 발전소 모의운영을 위한 기초 데이터 구축 과정에 해당된다. 이 과정에서 산정되는 비용과 편익은 사업규모의 함수이므로 최적규모 결정을 위해서는 경제성분석이 반드시 수행되어야 한다(심명필, 2001).

소수력에서 최적규모와 관련된 기존연구는 활발하지 않았다. 국내의 경우, 박완순 등(1997)이 실측자료를 바탕으로 최저 발전단가에서의 설계유량, 시설용량 등 기본 설계제원을 검토하였고, 안태진 등(1999)은 농업용댐에서의 소수력 부존 발전량 추정을 위하여 비선형계획 모형을 적용하여 분석하였다. 국외의 경우, Hosseini et al. (2005)은 수로식 소수력의 최적시설용량 결정을 위해 몬테카를로 방법을 이용하여 LOLE(Loss of Load Expectation)를 분석하였고, 관련 인자들의 민감도에 따른 경제성분석을 실시한 바 있다. Lopes de Almeida et al. (2006)은 소수력 발전소의 최적설계를 위해 OPAH 모형을 개발하였고, 사업규모와 시설물 운영의 최적화를 위해 다양한 인자들을 검토하여 경제성 및 민감도분석을 실시하였다. 이밖에 터빈과 설계유량이 경제성에 미치는 민감도를 분석하여 최적규모를 결정한 연구사례

도 있다(Anagnostopoulos and Papantonis, 2007; Aslan et al., in press).

본 연구에서는 소수력 개발지점에서의 최적규모 결정을 위해 규모에 따른 편익 및 비용을 산정하고, 이들 간의 관계에 의해 경제성이 극대화되는 규모를 결정하고자 하였다. 지형 및 유황분석을 위해 Arcview와 SWAT 모형을 이용하였고, 일단위 발전소 모의운영에 의해 산정된 편익과 기존 소수력발전소의 비용자료를 검토하여 제시한 초기비용 함수식과의 관계에 의해 최대 순현재가(NPV, Net Present Value)을 만족하는 최적규모를 결정하였다. 이러한 방법론의 적용을 위해 소수력 최적개발 활성화 방안 연구(한국수자원공사, 2007)에서 제시한 초강유역의 2개 지점을 대상으로 적용하였다.

하천제방 및 다목적댐 건설을 비롯한 일반적인 수자원사업에 비해 소수력 개발은 투입 자본의 양은 적지만 전체 투입자본에 비해 설계비가 과다하다는 단점이 있다. 그러므로 본 연구에서 제시한 방법은 해당 지점에서의 최적규모 및 경제성을 사전에 개략적으로 확인하여 잠재 소수력 부존량을 확인하고, 사업시행주체의 의사결정 지원 측면에서 활용도가 높을 것으로 기대된다.

## 2. 지형 및 수문자료의 구축

### 2.1 지형분석

전체 분석과정에서 가장 먼저 선행되어야 하는 기초 데이터 구축 과정으로 지형분석과 유황분석이 필요하다. 특히 소수력 개발과 관련한 지형분석의 항목에는 수량 및 수두 확보를 위해 설치하는 댐 시설물의 규모(높이) 별 저수용량(storage volume) 산정, 그리고 수로식의 경우 자연낙차의 산정이 포함된다. 댐식의 경우 충분한 유황이 확보되는 지점에서는 동일 규모에서 저수용량이 클수록 경제성이 좋은 반면에, 수몰면적이 증가되어 보상비가 증대된다는 단점이 있다. 수로식은 일반적으로 하류방향으로의 수로길이가 길수록 낙차는 증가하나 비용이 증가한다는 단점이 있다. 지형분석의 경우, 주로 종이지도를 이용하거나 실측자료를 이용하여 왔다. 그러나 복잡한 공간정보의 종합적이면서 체계적으로 관리할 수 있는 GIS의 활용이 점차 증대됨에 따라 소수력 개발 계획시 여러 가지 목적으로 GIS 활용이 가능하다고 판단된다.

### 2.2 유황분석

지형분석과 더불어 실시하는 유황분석은 크게 계측유역과 미계측유역에 대한 해석법으로 나눌 수 있다. 계측유역에 대한 해석법으로는 확정론적 모형, 확률론

적 모형, 추계학적 모형을 이용하는 방법이 있고, 미계측유역의 경우 인근 계측유역을 이용한 유역평균유출고법, 면적비법, 지역화법이 있다. 그 밖에 Weibull 분포를 이용한 특성화 방법, 가지야마 공식을 이용한 방법, KRIHS 모델, NRECA 모델 등을 이용한 방법이 있다. 국내 소수력과 관련한 장기유출분석 사례에는 심명필과 권오익(1994)이 평창강 수력지점에 대하여 Weibull 분포, NRECA, 가지야마, KRIHS 모형을 적용하여 비교, 검토하였고, 박완순 등(1997)의 연구에서는 Weibull 분포를 이용하여 유황을 분석하였다. 본 연구에서는 대상유역인 초강유역에서의 유량 실측자료가 존재하고, 다양한 수문성분 해석을 위한 기상자료 및 GIS 주제도를 이용할 수 있다는 점을 고려하여 최근 국내·외에서 많이 사용되고 있는 SWAT 모형을 이용하였다.

### 3. 최적규모의 결정

#### 3.1 발전소 모의운영

##### 3.1.1 설계유량의 결정

설계유량(design flow)은 유량지속곡선 상에서 25% 근처에 해당되는 유량 값을 기준으로 하여 결정하는 것이 일반적이다. Burrier and Jacobs(1980)는 월류댐을 갖는 소수력 발전소의 경우, 설계유량이 유량지속곡선 상에서 시간초과백분율 15~25%일 때의 유량으로 할 경우 가동율이 증가될 수 있다고 언급하였다. 그리고 Moore(1989)는 유량지속곡선 상에서 25%에 해당하는 유량을 사용하나 시산(trial and error)하여 사용할 것을 언급하였다. 즉, 하천에서의 소수력은 댐과 같이 규모가 큰 저수시설의 유무, 댐의 높이 및 유황의 불확실성에 따라서 적정 설계유량은 높아지거나 낮아질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지형분석 자료와 일단위 유출량 자료를 이용하여 대상지점의 유황특성과 지형특성을 반영한 발전소 모의운영을 실시한 후, Fig. 1과 같이 현재 가치화 된 총비용과 총편익의 차인 순현재가가 최대일 때의 유량을 설계유량으로 선택하였다.

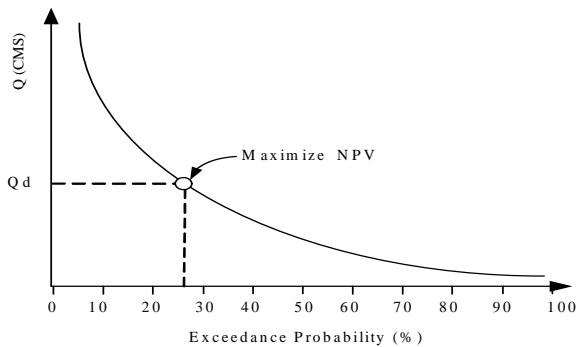


Fig. 1. Determination of Design Flow

##### 3.1.2 유효수두의 산정

낙차(head)란 소수력 발전 시스템의 출력을 산정하는데 있어서 매우 중요한 인자로서 물이 수차발전기에 도달하기까지의 수직거리를 의미하고, 수차발전기에 유용한 에너지인 유효낙차(net or effective head)는 Eq. (1)과 같이 총낙차(gross head)에서 손실수두(loss head)를 제외한 것이다.

$$H_e = H_g - H_L \quad (1)$$

여기서,  $H_e$ : 유효낙차(m)

$H_g$ : 총낙차(m)

$H_L$ : 손실수두(m)

이를 위해 본 연구에서는 국내 댐식 소수력 발전소에서의 댐 높이와 유효낙차와의 평균적인 비를 이용해 산정한 Eq. (2)에 의해 유효낙차를 산정하였다(한국수자원공사, 2007).

$$H_d' = 0.7 H_d \quad (2)$$

여기서,  $H_d$ : 댐 높이

$H_d'$ : 댐식 소수력에서의 유효낙차

수로식 소수력은 Eq. (3)과 같이 취수보의 높이에 의한 낙차와 수로길이에 따른 자연낙차를 구분하여 유효낙차를 계산하였다. 본 연구에서는 취수보 높이에 의한 낙차는 댐 높이의 1/2로 하였고, 수로길이에 따른 자연낙차에서는 미개척국(USBR, 1976)에서 제시한 총 수두의 10%가 손실되는 것으로 하였다.

$$H_a = \frac{1}{2} H_d + 0.9 H_n \quad (3)$$

여기서,  $H_d$ : 댐 높이

$H_n$ : 자연낙차

$H_a$ : 수로식 소수력의 유효낙차

##### 3.1.3 연평균발전량의 추정

소수력의 성공적인 개발을 위해서는 기존의 수자원 개발계획과 마찬가지로 자원의 효율적인 이용과 경제성을 기초로 일련의 체계적인 연구가 단계적으로 수행되어야 한다. 소수력 개발의 관건은 소수력발전소의 효율성을 높이고, 경제성이 높은 설계유량 및 시설용량(installed capacity) 등을 결정하는 일이다. 설계유량과 시설용량 등이 결정되면 소수력의 편익과 관련되는 연간발전량을 추정할 수 있다. Eq. (4)는 결정된 최적 설계유량에 의해 산정한 시설용량을 나타내고, 연평균발

전량은 Eq. (5)를 통해 산정할 수 있다.

$$C = 9.8 Q_d H_c \eta \quad (4)$$

$$E = 8,760 \times Q_{av} H_c \eta \quad (5)$$

여기서,  $Q_d$ : 설계유량( $m^3/sec$ )

$Q_{av}$ : 평균유량( $m^3/sec$ )

$H_c$ : 유효낙차(m)

$\eta$ : 발전효율(%)

### 3.1.4 발전소 모의운영

연평균발전량의 산정을 위해 유량지속곡선을 이용한 방법은 비교적 간편하지만 댐으로 인한 인위적인 저수량의 변화와 발전보류와 같은 특성을 반영할 수 없다. 특히, 시간에 따른 유량의 변화가 아닌 순차적인 유량에 대한 분석이기 때문에 실제 시간별 발전량에 대한 설명에는 한계가 있다. 수로식의 경우는 차이가 미미하지만 댐식의 경우 유량지속곡선은 저수지 운영에 의한 실제 방류량(발전에 쓰이는 양)과 차이가 있다. 이러한 단점을 보완한 방법이 발전소 모의운영으로서, 일 또는 월별 시간 경과에 따라 순차적으로 저수지를 모의운영하여 연평균발전량을 산정한다(Gulliver and Arndt, 1991). 이를 위해서는 기본적으로 유입량 자료와 저류량 변화에 따른 낙차변화가 고려되어야 한다. 저수지 모의운영의 기본 방정식은 Eq. (6)과 같은 연속방정식을 기본으로 한다. 여기서, 손실량에는 증발산량, 하천 유지유량, 기타용수 사용에 따른 손실량 등이 포함될 수 있다.

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - L_t \quad (6)$$

여기서,  $S_t$ : 시간 t일 때의 저류량

$I_t$ : 시간 t일 때의 저수지로의 유입량

$O_t$ : 시간 t일 때의 저수지로부터의 방류량

$L_t$ : 시간 t일 때의 손실량

## 3.2 경제성분석

국내 소수력 개발사업의 경제성분석 사례를 살펴보면 내용연수, 할인율, 편익 및 비용의 항목 등과 같은 기초요소는 물론 분석절차조차 일관성이 없는 경우가 많았고, 이러한 객관성과 합리성 결여는 사업 타당성을 저하시키는 원인이었다. 경제성분석이란 사회후생(social welfare)의 극대화 측면에서 사업의 계획단계 혹은 사후에 사업에 대한 경제적 타당성을 분석, 평가하는 것을 말하며 편익·비용분석(benefit cost analysis)이 일반적으로 사용된다. 경제성분석 지표로는 편익·비

용비(B/C), 순현재가(NPV) 및 내부수익률(IRR) 등이 사용되는데 이러한 평가지표들은 투자사업을 평가하는데 상호 배타적인 개념이 아니라 보완적인 기준으로 사용된다.

### 3.2.1 경제성분석의 기초요소

#### 1) 할인율

할인율(interest rate)이란 돈의 시간적 가치를 반영하여 미래가를 현재가치로 환산하는 환산율을 의미한다. 소수력을 비롯한 수자원사업에 대한 경제성분석은 분석기간 동안 편익과 비용을 산정하여 합산하여야 하나 각기 다른 기간마다 다른 크기로 발생하는 비용과 편익을 명목가치 그대로 비교하기 어려우므로 이것을 모두 현재가치로 바꾸어 주어야 한다. 현재 국내 수자원 사업과 관련한 할인율은 댐설계기준(건설교통부, 2001)에서 7.5%, 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정보완연구(한국개발연구원, 2004)에서는 사업 후 30년까지 6.5%, 이후 5%의 할인율을 제시하고 있다. 그러나 소수력 개발 사업과 관련한 할인율 적용사례는 소수력발전타당성 조사(한국수자원공사, 2002)와 소수력개발 적지조사(한국수자원공사, 2006)에서 8%, 신재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS제도와 연계방안(산업자원부, 2006)에서는 7%를 적용한 바 있다. 개발도상국의 경우에는 소수력 사업의 할인율을 8~10%로 설정하여 사용하고 있다(Hosseini et al., 2005).

#### 2) 내용연수

소수력 개발 사업의 경제성을 분석하기 위해서는 우선적으로 해당 사업의 효과가 몇 년이나 지속될 것인가 하는 기간이 결정되어야 한다. 구조물의 수명은 일반적으로 물리적 수명(physical life)과 경제적 수명(economic life)으로 구분할 수 있다. 여기서 물리적 수명이란 투자된 시설물이 노후화 되어 목적한 기능을 수행하지 못하게 될 때까지의 기간을 말하며, 기존의 시설이 비경제적이 되어 쓸모가 없게 되었을 때 경제적 수명에 도달하였다고 말한다. 경제적 수명이 다한 시설을 계속 가동하면 경제적 손실이 발생하는데 이때까지의 기간을 시설물의 내용연수(lifetime)라 하여 물리적 수명과 구분한다. 일반적으로 경제성 분석에서는 시설물의 경제적 측면이 중요하므로 투자시설물의 내용연수를 기준으로 사업분석 기간을 결정해야 하며, 물리적으로 남은 시설물은 순간존가치로 평가하여 편익항목에 합산하면 된다. 「댐건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률 시행령」 제27조 [별표 3] 규정에는 발전사업의 경우 감가상각율을 2%, 내용연수를 45년으로 명시하고 있다.

### 3) 유지관리비

소수력발전소의 유지관리비(OM&R, Operating, Maintenance and Replacement costs)는 내용연수 동안 매년 반복적으로 발생하는 노무비, 재료비, 경상비 등과 비반복적으로 발생하는 고장, 수리, 대체에 따른 비용 등으로 구성된다. 유지관리비는 공사기간이 짧은 공사계획의 경우에는 완공 후 부터 발생하는 것으로 계산하며, 공사기간이 긴 사업의 경우는 공사기간 중의 적정년도부터 발생하는 것으로 간주한다. 국내 수자원분야의 경우 「수자원부문 표준지침」(한국개발연구원, 2003)에서 0.5~2.0%를 원칙으로 하고 있으나, 최근 이 비율이 수자원사업 분야에서 적용하기에는 작다는 문제점이 자주 제기되어 최근에는 3%를 주로 적용하고 있는 실정이다. 또한 신재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS제도와 연계방안 연구에서도 소수력 사업에서의 유지보수비를 3%로 적용하였다(산업자원부, 2006).

### 3.2.2 편익 및 비용의 산정

#### 1) 편익의 산정

소수력 개발로 인한 편익은 크게 수력발전으로 인한 직접편익(direct benefit)과 레크리에이션, 관개, 홍수조절 등과 같은 간접편익(indirect benefit)으로 구분할 수 있다. 간접편익은 그 효과가 직접편익에 비해 미비하고 개량화의 어려움 때문에 소수력 개발의 주목적과 관계되는 수력발전 편익만을 고려하는 것이 일반적이다. 대수력의 발전편익의 경우 일반적으로 대체화력평가법을 이용하는 반면, 소수력의 경우 전력 기준가격을 바탕으로 편익을 산정한다. 우리나라의 전력 기준가격은 그동안 물가의 상승 및 여건의 변화에 따라 상승해 왔으며, 현재 기준가격은 2006년 고시된 발전차액지원제도에 따라 10,000kW 이하의 경우 94.64원/kWh이다. 소수력 최적

개발 활성화 방안 연구(한국수자원공사, 2007)에서는 이를 반영하여 94.64원/kWh을 기준가격으로 반영한 바 있다. 연평균편익은 Eq. (10)과 같이 발전소 모의운영에 의한 연평균발전량과 전력 기준가격에 의해 산정되며, Fig. 2는 연평균편익을 현재가치화 하여 총편익을 산정하는 자본흐름을 나타낸다.

$$B_a = E_a \times P \quad (10)$$

여기서,  $B_a$ : 연편익(원)

$E_a$ : 연평균발전량(kWh)

$P$ : 전력기준가격(원/kWh)

#### 2) 비용의 산정

소수력 개발에 따른 비용은 크게 초기비용(initial cost)과 연간비용(annual cost)으로 구분된다. 초기비용은 다시 직접비용(direct cost)과 간접비용(indirect cost)으로 구분되며, 직접비용에는 토목비, 기전시설비, 송전시설비 등이 포함되고, 간접비용에는 조사비, 설계비, 관리비, 보상비 등이 있다. 초기비용은 개발 시작 단계에서 발생하는 반면, 연간비용은 대표적으로 발전소를 운영함에 따라 매년 발생하는 유지관리비가 있다. Fig. 3는 총비용산정을 위한 자본 흐름을 나타낸다. 더불어 공사기간(construction duration)은 규모에 따라 일반적으로 1~6년 정도 소요되며, 공사기간동안의 투입비용 분포는 Table 1과 같다(USACE, 1985).

자세한 실시설계가 이루어지기 전에는 초기비용을 개략적으로 검토할 수밖에 없다. 따라서 본 연구는 Eq. (11)과 같이 수로식, 댐식에 모두 적용 가능한 초기비용 함수식(2007년 2월 기준)을 도출하였다. 함수식 추정을 위해 우리나라에서 과거 개발된 금강, 봉화를 비롯한 소수력발전소(10개소)의 자료와 현재 개발 중인 소수력

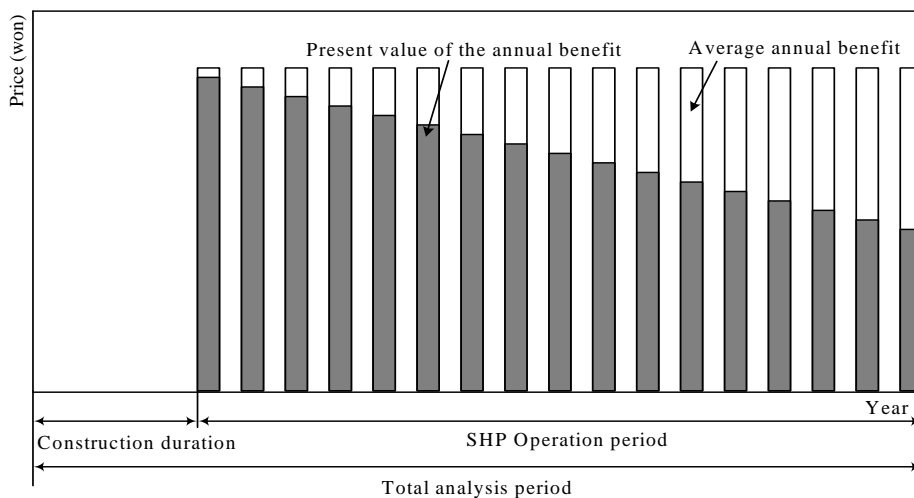


Fig. 2. Cash Flow Diagram for the Benefit Estimation

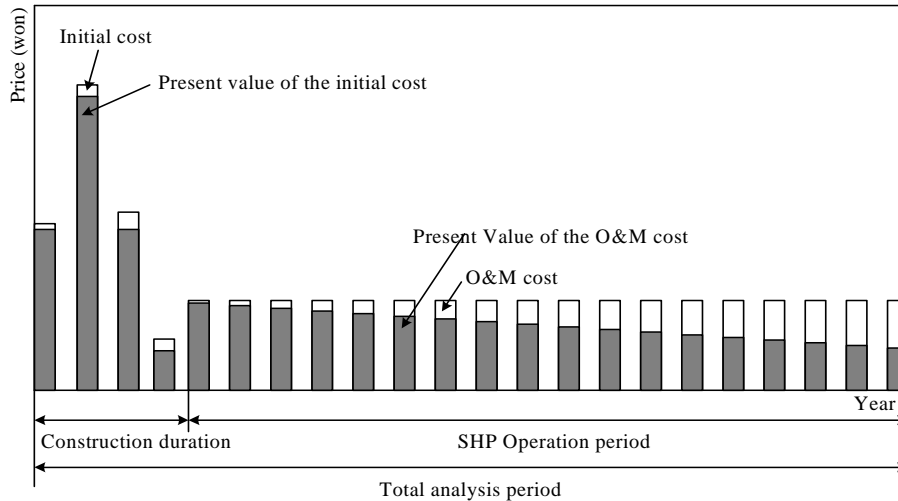


Fig. 3. Cash Flow Diagram for the Cost Estimation

Table. 1. Distribution of Costs versus Construction Duration

Construction duration	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)	6 (%)
1	100	-	-	-	-	-
2	77	23	-	-	-	-
3	37	56	7	-	-	-
4	16	62	18	4	-	-
5	9	49	30	9	3	-
6	6	31	40	15	6	2

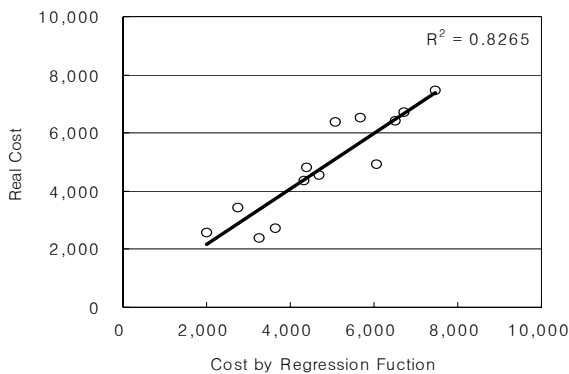


Fig. 4. Comparison of the Real Cost and Estimated Cost

발전소(3개소)의 설계내역서를 참고하였다(한국전력공사, 1993). 도출된 초기비용 함수식은 Fig. 4에서 보듯이 상당히 유의성을 갖는 것으로 나타났다. Eq. (11)은 기존시설물을 이용한 소수력이나 마이크로(micro) 또는 미니(mini) 소수력을 제외한 시설용량 300kW 이상의 하천유역에서의 소수력을 대상으로 한다.

$$C = 1083.239771 + 1.858211 I + H^{2.691258} + L^{0.587345} \quad (11)$$

여기서,  $C$ : 초기비용(백만원)  
 $I$ : 시설용량(kW)  
 $H$ : 댐높이(m)  
 $L$ : 수로길이(m)

### 3.3. 최적규모 결정

최적규모 결정이란 일반적으로 결정된 여러 대안들에 합리성을 부여하는 대안수립의 최종과정이라고 볼 수 있다. 최적규모는 사업주체가 추구하는 목적에 따라 달라질 수 있으며, 제반 여건에 따라서 조정될 수도 있다. 또한 사업의 최적규모를 결정하는 과정에서 사업의 목표와 편익 그리고 개발에 따른 부작용을 신중히 고려하여야 한다. 최적규모 결정에 대한 기준은 기술적, 환경·생태학적, 재무성평가 등이 고려되어야 하지만 경제적 효율성에 집중되는 것이 일반적이다. 그리고 사업비용과 편익은 사업규모의 함수이므로 최적규모를 결정하기 위해서는 경제성분석이 수행되어야 한다.

최적규모 결정을 위한 경제성분석은 해당 사업의 규모에 따라 변하는 총비용(TC, total cost)과 총편익(TB, total benefit)을 분석하여 결정하게 된다. 이러한 총비용과 총편익의 변화를 규모에 따라 표시한 것이 총비용곡선(total cost curve)과 총편익곡선(total benefit curve)이다. 총비용곡선은 생산에 필요한 투입요소들의 개별비용을 합산하여 나타내고, 총편익곡선은 생산된 개별 산출물들을 소비함으로써 얻어진 가치를 합산하여 각각 생산규모에 따라 곡선으로 나타낸 것이다. Fig. 5는 규모에 따른 총비용과 총편익의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 총비용과 총편익의 종거차가 가장 큰 규

모에서 순현가는 최대가 되며 순현가가 최대가 되는 점은 한계비용과 한계편익이 만나는 P점이 된다. 따라서 P점은 최적규모가 된다(심명필, 2001).

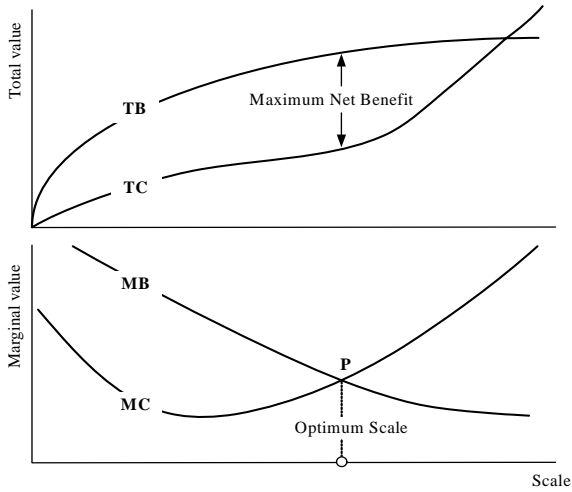


Fig. 5. Determination of Optimum Scale

#### 4. 적용 및 결과 : 초강유역 사례연구

본 연구의 사례연구를 위하여 금강에 위치한 초강유역을 선정하였다. 초강은 우리나라 5대강 유역의 하나인 금강의 제 1지류로서 경북 상주군 화서면의 계곡에서 발원하여 남쪽으로 흐르며, 충청북도 영동군 황간면에서 추풍령천과 고자천을 합류한 뒤 영동군 심천면을 지나 금강에 흘러든다. 영동군의 주요 관개하천이며, 유로연장은 63.18km, 유역면적은 664.62km<sup>2</sup>에 달한다. 대상지점은 소수력 최적개발 활성화 방안 연구(한국수자원

공사, 2007)의 내용을 참고하여 충북 영동군 심천면 용당리에 위치한 댐식(Site A), 충북 영동군 용산면 시금리에 위치한 수로식(Site B) 소수력 지점 1개씩을 선정하였다. Fig. 6은 초강유역의 수계현황과 대상지점의 위치를 나타내고 있다.

위와 같은 대상지점에서 적용을 위한 분석절차는 Fig. 7과 같다. 지형분석과 유황분석시 GIS-tool인 Arcview와 SWAT 모형을 이용하였고, 구축된 기초데이터를 바탕으로 일단위 발전소 모의운명을 실시하였다. 발전소 모의운영시 본 연구에서는 발전효율을 85%, 터빈의 최대·최소유량을 설계유량의 115, 30%, 터빈은 1unit으로 가정하였다. 또한 댐식 소수력의 경우 저수지 모의시 최대 저수용량을 초과하여 월류하는 유량에 대해서는 발전 사용수량에서 제외하였고, 미발전 기간 동안에만 하천유지유량을 방류하였다. 수로식 소수력 또한 저수지 모의시 최대 저수용량을 초과하여 월류하는 유량은 발전 사용수량에서 제외하였고, 수로변경으로 인한 유황감소를 고려하여 상시 하천유지유량을 방류하였다.

경제성분석시 「댐건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률 시행령」 제27조 [별표 3] 규정에 의거하여 내구연한 45년, 감가상각률 2%를 적용하였다. 또한 2007년을 기준연도로 하여 공사기간은 1년으로 계획하였다. 할인율은 신재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS 제도와 연계방안(2006)에서 제시한 7%가 타당하다고 판단하여 적용하였다. 경제성분석시 할인율은 7%, 내용연수 45년, 감가상각률 2%로 적용하였고, 공사기간은 1년으로 설정하였다.

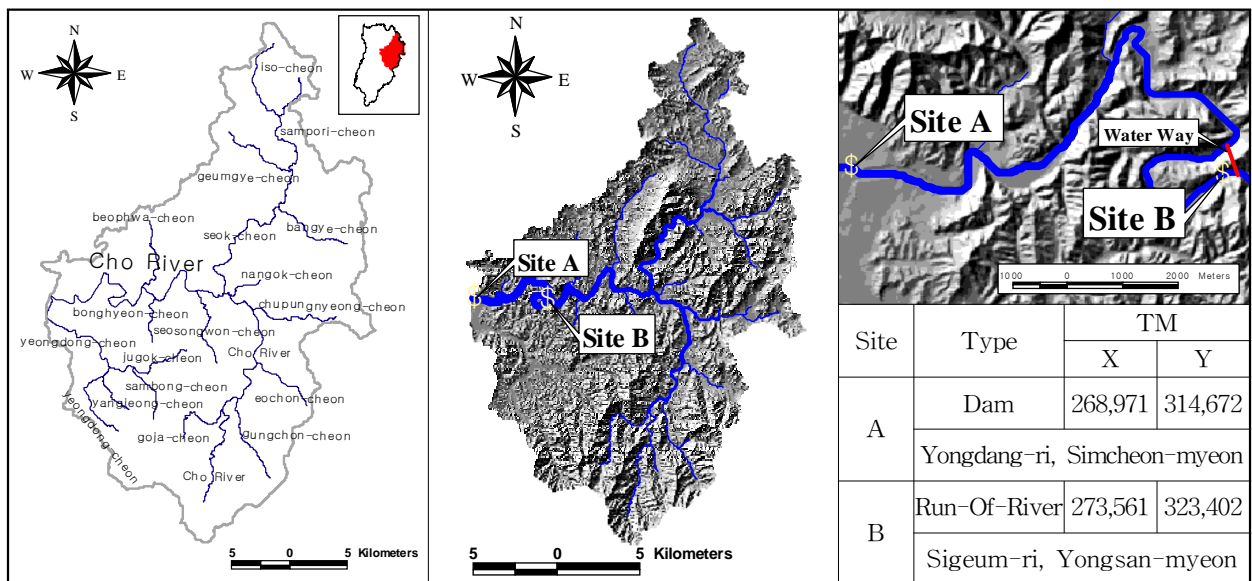


Fig. 6. Cho River Basin and Target Sites

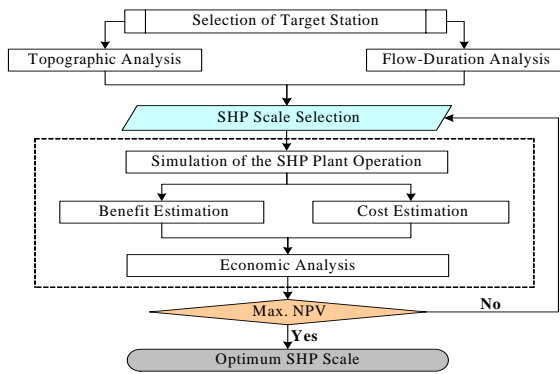


Fig. 7. Flow diagram for determining SHP optimum scale

경제성분석을 통하여 설계유량의 변화에 따른 경제적 타당성의 민감도를 확인하였고, 그 지표로서 순현재가(NPV)를 이용하였다. 소수력 발전소의 시설물에 대한 규모 또한 순현재가 비교를 통해 결정하였으며, 댐식 소수력인 Site A에서는 댐높이를 5, 10, 15, 20m로, 수로

식 소수력인 Site B에서는 댐높이 5m를 기준으로 400, 600, 800, 1,000m 수로길이에 대하여 분석하였다.

#### 4.1. Site A 분석 결과

댐식 소수력 지점인 Site A에서 유행분석 결과는 Fig. 8, 9와 같다. Site A에서 구축된 기초데이터를 바탕으로 발전소 모의운영과 경제성분석을 실시하였고, 댐 높이 5, 10, 15, 20m일 때의 최적 설계유량과 하천유지유량, 시설용량, 연평균발전량은 Table 2와 같다. 그리고 Fig. 10은 댐높이와 설계유량의 변화에 따른 경제적 타당성의 민감도를 나타내고, 이로 인해 최적 설계유량과 최적규모(수로길이)를 선택하였다. 그 결과 NPV와 B/C, IRR 모두 규모 15m에서 가장 좋은 결과를 보여주고 있는 반면, 규모 5m의 경우, 경제성 B/C가 1 이하로 나타나 경제성이 없는 것으로 나타났다. Table 3은 Site A에서 규모별 최적 설계유량에서의 경제성분석 결과를 보여주고 있다.

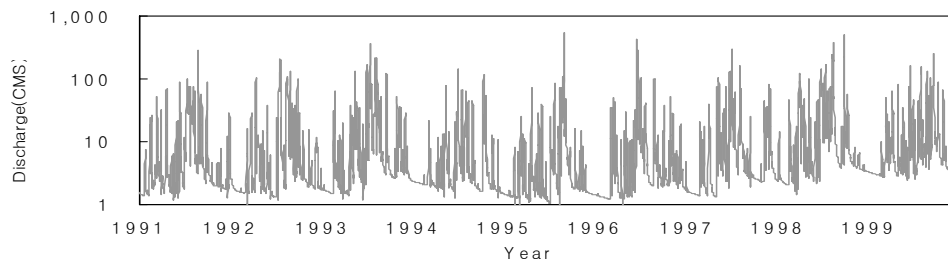


Fig. 8. Flow Discharge (Site A)

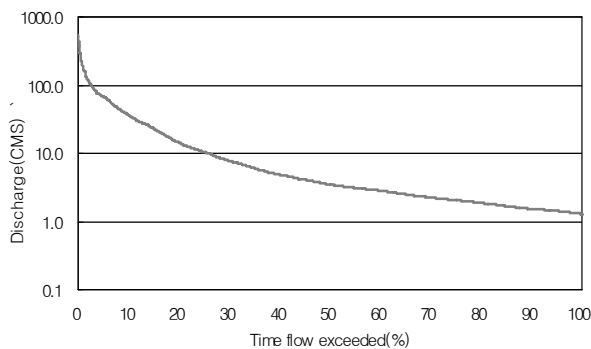


Fig. 9. Flow-Duration Curve (Site A)

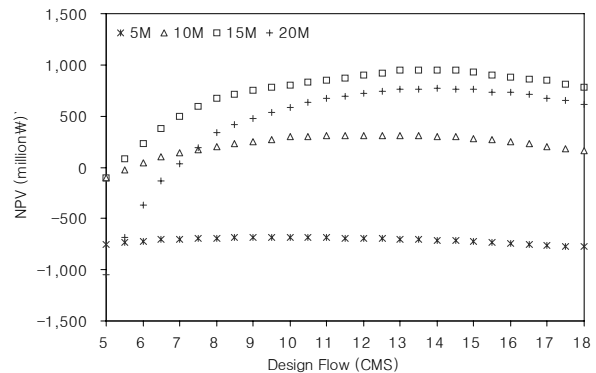


Fig. 10. Design Flow-NPV by Dam Height (Site A)

Table. 2. Results of SHP Plant Operation (Site A)

Dam Height (m)	Design flow (m <sup>3</sup> /sec)	Instream flow (m <sup>3</sup> /sec)	Install Capacity (kW)	Annual Generation Capacity (MWh)
5	9.5	1.60	277.26	1,265.76
10	13.5	1.60	787.99	3,350.88
15	14.0	1.60	1,225.76	6,073.23
20	14.0	1.60	1,634.35	8,629.35



Table. 3. Economic Analysis Results by Dam Height (Site A)

Dam Height (m)	Total Benefit (million ₩)	Total Cost (million ₩)	NPV (million ₩)	B/C	IRR (%)
5	2,203.70	1,523.95	-679.75	0.69	3.12
10	3,999.04	4,320.35	321.30	1.08	7.92
15	6,348.18	7,310.61	962.42	1.15	8.71
20	9,597.56	10,387.71	790.15	1.08	7.94

4.2. Site B 분석 결과

수로식 소수력 지점인 Site B에서 유황분석 결과는 Fig. 11와 같고, 이로 인해 도출된 유량지속곡선은 Fig. 12이다. 구축된 기초데이터를 바탕으로 수로길이에 따른 발전소 모의운영, 그리고 경제성분석을 실시하였다. Fig. 13는 설계유량의 변화에 따른 경제적 타당성의 민

감도를 나타내고, 이로 인해 최적 설계유량과 최적규모(수로길이)를 선택하였다. Table 4는 규모별 유효수두, 최적 설계유량과 하천유지유량, 시설용량, 연평균발전량을 나타낸다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 수로길이가 1,000m일 때 NPV, B/C, IRR 모두 상대적으로 높게 나왔으나, Table 5와 같이 전 규모에서 모두 B/C가 1 이하로 나와 경제성은 없는 것으로 나타났다.

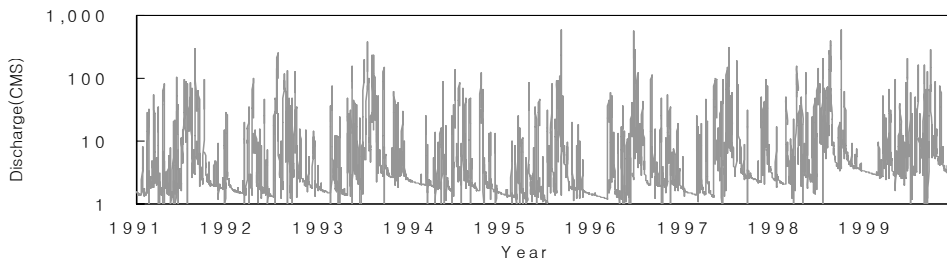


Fig. 11. Flow Discharge (Site B)

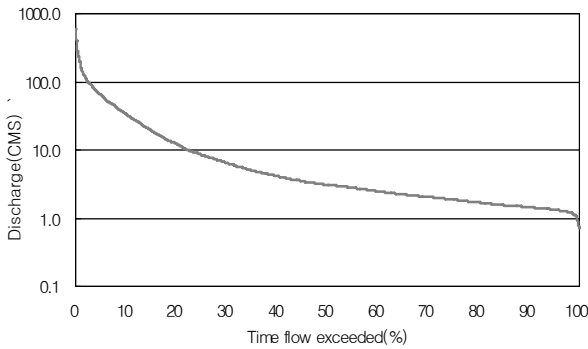


Fig. 12. Flow-Duration Curve (Site B)

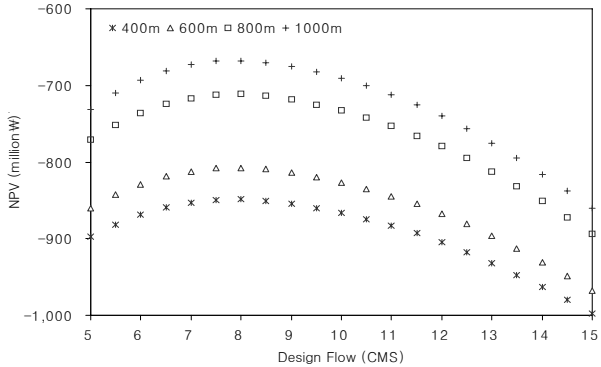


Fig. 13. Design Flow-NPV by Dam Height (Site B)

Table. 4. Results of SHP Plant Operation (Site B)

Length of Waterway (m)	Net Head (m/sec)	Design flow (m/sec)	Instream flow (m/sec)	Installed Capacity (kW)	Annual Generation Capacity (MWh)
400	6.10	8.00	1.26	406.92	1,425.76
600	6.55	8.00	1.26	436.94	1,530.94
800	7.45	8.00	1.26	496.97	1,741.30
1,000	7.90	8.00	1.26	526.99	1,846.47

Table. 5. Economic Analysis Results by Waterway (Site B)

Length of Waterway (m)	Total Benefit (million ₩)	Total Cost (million ₩)	NPV (million ₩)	B/C (ratio)	IRR (%)
400	2,565.21	1,716.61	-848.60	0.67	2.80
600	2,650.56	1,843.21	-807.35	0.70	3.17
800	2,807.76	2,096.41	-711.36	0.75	3.88
1,000	2,890.52	2,223.00	-667.51	0.77	4.18

### 5. 분석 및 고찰

본 연구에서 댐식 소수력 대상지점인 Site A의 경우, 댐높이 15m에서 NPV가 9.6242억원, B/C가 1.15, IRR이 8.71%로 계산되어 최적규모로 결정되었다. 이때의 최적 설계유량은 14m<sup>3</sup>/sec로서 이 값은 유량지속곡선 상에서 시간초과백분율 19.8%에 위치하였고, 전 규모에서의 최적 설계유량은 20~30% 사이에 분포됨을 확인하였다.

수로식 소수력 지점인 Site B의 경우, 설계유량 변화에 따른 NPV는 전 규모에서 비슷한 변화 양상을 보였고, 최적 설계유량은 하류에 위치한 Site A에 비해 낮은 8m/sec<sup>3</sup>로서 이 값은 유량지속곡선 상에서 시간초과백분율 25.6%에 위치하는 것을 확인할 수 있었다. 경제성분석 결과 수로길이 1,000m에서 가장 높은 NPV를 나타내었고, 이 때의 B/C는 1보다 작아 경제성이 없는 것으로 나타났다. 이는 수로길이에 비해 상대적으로 낙차가 작고, 설계유량에 비해 하천유지유량 방류량이 상대적으로 크기 때문으로 판단된다.

### 6. 결론

소수력 개발을 위한 경제성분석과 최적규모 결정의 목적은 다양한 규모에 대한 개발 타당성을 경제적 측면에서 분석하여 개발에 따른 위험을 사전에 확인하고자 하는 것이다. 특히 설계유량 결정은 소수력발전소의 타당성과 직결된 매우 중요한 요소 중 하나이다. 그러나 기존에는 유량지속곡선 상에서 특정 시간초과백분율에 해당하는 유량값을 선택하여 설계유량을 결정하는 단편적 방법이 사용되어왔다.

이러한 방법은 개발 대상지점의 지형적인 특성이나 유황의 변동성을 고려하기 어렵기 때문에 경제적 효율성 측면에서 최적화된 발전규모를 결정하기 힘든 문제점이 있다. 특히, 우리나라는 지형적 특성이 다양하고, 계절에 따른 유황변동이 크므로, 이와 같이 지형특성과 유황특성이 결여된 방법으로는 시·공간적 유황변화 양

상을 능동적으로 반영할 수 없게 된다.

본 연구는 이러한 문제를 개선하고자 시·공간 자료를 적극 활용하였고, 시간에 따른 순차적인 발전소 모의운영을 실시하여 시간에 따른 순차적인 발전량을 산정할 수 있었다. 또한 경제성분석에 의한 최적규모를 결정하는 과정에서 사업규모별 경제성의 변화양상과 민감도를 분석함으로써 최적 설계유량 및 시설물의 최적 규모를 확인할 수 있었다. 이와 같이 최적규모 분석에 의해 경제적 효율성을 최적화 하는 방법은 분석에 의한 결과 뿐만 아니라 분석과정에서 획득한 합리적인 정보를 의사결정자인 사업시행주체에게 제공하여 의사결정시 중요한 지원수단이 될 것으로 판단된다.

한편, 초기비용의 산정을 위해 추정한 함수식은 기초 자료의 양이 부족하기 때문에 향후 건설되는 소수력발전소의 자료를 이용하여 보완 내지 개선이 필요하다고 판단된다. 또한 직접편익 항목인 수력발전편익 뿐만 아니라 레크리에이션, 탄소배출권 획득과 같은 신규편익 추가방안에 대해서도 향후 연구가 필요하다고 판단된다.

### 참고 문헌

건설교통부 (2001). **댐설계기준**.  
 김남원, 정일문, 원유승, 이정우, 이병주 (2006). “시공간적 변동성을 고려한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정.” **한국지하수토양환경학회지**, 한국지하수토양환경학회, 제11권, 제5호, pp. 9-19.  
 박완순, 이철형, 심명필 (1997). “국내 소수력발전입지의 개발타당성 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제17권, 제 II-3호, pp. 197-205.  
 산업자원부 (2006). **신·재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS제도와 연계방안**.  
 심명필, 권오익 (1994). “미계측 소수력의 발전량 추정 방법의 비교.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 45-50  
 심명필 (2001). 수자원 경제성분석 입문(10). **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 75-83.

- 안태진, 류희정, 박정응 (1999). “최적화기법을 이용한 기존 농업용 저수지에서의 부존 수력발전량 추정” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제3호, pp. 281-289.
- 한국개발연구원 (2003). **수자원(댐)부문사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판)**.
- 한국개발연구원 (2004). **예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정보완연구**.
- 한국수자원공사 (2006). **소수력개발 적지조사**.
- 한국수자원공사 (2002). **소수력발전타당성 조사**.
- 한국수자원공사(2007). **소수력 최적개발 활성화 방안 연구**.
- 한국전력공사(1993). **수력발전소자료집**
- Anagnostopoulos, J. S., Papantonis D. E. (2007). “Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant.” *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, pp. 2663-2670.
- Aslan, Y., Arslan, O., Yasar, C. (in press). “A sensitivity analysis for the design of small-scale hydropower plant: Kayabogazi case study.” *Renewable Energy*.
- Hosseini. S. M. H., Forouzbakhsh, F. Rahimpour, M. (2005) “Determination of the optimal installation capacity of small hydro-power plants through the use of technical, economic and reliability indices.” *Energy Policy*, Vol. 33, pp. 1948-1959.
- Lopes de Almeida, J.P.P.G., Henri Lejeune, A.G., Sá Marques, J.A.A., Conceção Cunha, M. (2006). “OPAH a model for optimal design of multipurpose small hydropower plants.” *Advances in Engineering Software*, Vol. 37, pp. 236-247.
- USACE (1985). *Engineering and design hydropower handbook*. vol. II. Chapter 8, pp. 1-26
- USBR (1976). *Selecting hydraulic reaction turbines*, Engineering Monograph. No. 20.

(논문번호:06-81/접수:2006.07.28/심사완료:2007.01.26)