

수력발전기의 경쟁적 입찰전략이 전력시장에 미치는 영향

論 文

54A-9-6

Effect of Bidding Strategies of Hydro Generation on an Electricity Market

李 光 浩[†]
(Kwang-Ho Lee)

Abstract - This paper addresses the bidding strategies of a hydro generator in an electricity market, and their effect on the electricity market in accordance with some parameters: the water volume, the demand elasticity, and the hydro unit performance. The competition of a hydro generator is formulated as a bi-level optimization problem, and the solving scheme for the equilibrium condition is proposed as a set of nonlinear simultaneous equations. The equilibrium of the oligopolistic model is evaluated by comparison with that of a perfect competition model from the viewpoint of a market power. Simulation results show some parameters have an influence on the market power of an electricity market including a hydro generator.

Key Words : Electricity Market, Hydro Generation, Bid Strategy, Hydro-Thermal Coordination, Nash Equilibrium

1. 서 론

발전기술의 향상과 정보통신기술의 발달을 계기로 전력산업의 구조개편은 해외와 국내에서 꾸준히 진행되어 왔다. 국내에서는 배전부문에 대해서는 계획의 수정이 불가피하게 되었지만 발전시장에서는 분할된 발전회사들의 민영화와 경쟁도입을 통해 효율성을 높이려는 노력이 지속되고 있다.

발전부문의 경쟁시장을 해석하기 위해 게임이론, 경제학이론 등이 사용되어 많은 연구 성과가 있었으나 이는 주로 연료비용이 소요되는 화력발전에 대한 것이었다[1,2]. 수력발전의 경우에도 어떠한 특성이 입찰과정에서 어떻게 작용하며 시장지배력의 행사 가능성 분석과 적절한 시장구조 및 규칙을 정하는 것은 시장 전체의 효율성 향상에 중요한 요소이다[3]. 수력발전은 자원과 비용특성이 화력발전과 크게 다르기 때문에 다른 방식의 최적화가 필요하다. 기존의 수직독점형 구조에서 수력발전의 단기 운용 계획은 화력발전기의 비용특성과 연계되어 최적화 과정을 통해 수립된다[4]. 하지만 경쟁형 전력시장에서는 수력의 자원특성과 화력의 비용특성이 일괄 종합되질 못하고 발전회사의 이득 극대화를 위한 전략적인 입찰자료가 시장에 제시되기 때문에 기존의 수화력협조(hydro-thermal coordination) 이론으로는 경쟁의 균형을 해석하기 어렵다.

수력과 화력발전이 혼합된 발전시장을 해석하기 위해서는 발전회사의 입찰전략을 분석하는 모형이 필요한데 이러한 기법은 크게 3가지로 분류된다[5]. 첫째는 현물시장에서의

가격을 예측하고 예측된 가격정보를 기초로 이득 극대화 전략을 수립하는 방법이고[6,7,8], 둘째는 게임이론에 적합한 경쟁 모형을 수립하고 내쉬균형을 계산함으로써 시장의 가격과 발전력 그리고 입찰전략을 해석하는 방법이다. 세 번째는 경쟁상대의 입찰전략 모형을 수립한 후에 이를 대상으로 이득극대화를 수행하는 방법[5]이다.

시장가격을 예측하는 것은 힘들 뿐 아니라 분석대상이 되는 발전회사의 입찰전략이 시장가격에 미치는 영향이 고려되지 않기 때문에 정확성에는 한계를 갖는다. 또한 경쟁시장에서 입찰전략은 상대적이기 때문에 자신의 전략을 제외하고 상대방의 전략을 모형화한다는 것도 무리가 따른다. 이러한 점을 고려할 때 수화력경쟁에 대해 가격과 거래량의 상관관계를 해석하기 위해서는 게임이론에 근거한 모형화와 균형점 해석법의 적용이 적합하다.

본 연구에서는 공급함수모형을 근거로 수화력 발전의 입찰 및 경쟁모형을 수립하고 2단계(bi-level) 최적화 기법을 통하여 입찰전략의 내쉬균형의 조건식을 유도한다. 또한 균형조건에서 나타나는 수자원의 가격정보와 기존의 수화력협조 이론에서 유도되는 잠재가격(shadow price)의 의미를 비교 분석한다. 그리고 수력발전이 과점구조에서 경쟁적으로 사용될 때 완전경쟁에서의 결과와는 어떠한 차이를 갖는지, 이러한 차이는 수요탄력성 등에 따라 어떠한 변화를 보이는지를 분석한다.

2. 고전적 수화력협조 문제

2.1 정식화와 최적조건

화력발전기의 연료비용 특성과 수력발전기의 수자원정보가 통합되어 전체 발전비용을 최소화하는 최적의 수력 및 화력의 발전력을 시구간별로 결정하는 것이 수직통합형 전력산업 구조에서의 고전적 수화력협조 문제이다. 간단한 표

[†] 교신저자, 正 會 員 : 檀 國 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

E-mail : khlee@dku.edu

接受日字 : 2005年 6月 14日

最終完了 : 2005年 8月 15日

현을 위해 수력기(G_h) 1대와 화력기(G_t)를 대상으로 문제를 정식화하면 다음 식(1)과 같다.

$$\min \sum_{i=1}^I n_i \cdot F(q_{ti}) \quad (1a)$$

$$\text{s.t. } V = \sum_{i=1}^I n_i v_i \quad (1b)$$

$$D_i = q_{hi} + q_{ti} \quad i=1, \dots, I \quad (1c)$$

$$q_{tmin} \leq q_{ti} \leq q_{tmax}, \quad q_{hmin} \leq q_{hi} \leq q_{hmax} \quad (1d)$$

여기에서 사용되는 기호는 다음과 같이 정의된다.

q_{hi} : 구간 i 에서 각각 발전기 G_t 와 G_h 의 출력

v_i : 구간 i 에서 발전기 G_h 의 수자원 사용량

F : 발전기 G_t 의 발전비용 함수

D_i : 구간 i 에서 전력 수요

n_i : 구간 i 에서의 시간 수

V : 전체 구간에서 G_h 가 사용 가능한 저수 총량

운용계획의 대상 기간을 I 개의 시구간으로 구분하여 표현하였으며 목적함수는 전 구간에서의 화력발전기 발전비용 총합으로 정의된다. 식(1b)는 수자원의 제약조건이고 식(1c)는 수급조건, (1d)는 발전력의 상하한치 조건이다. 이외에도 구간별 물 사용량 등 수자원에 대한 제약조건이 있을 수 있다. 수력발전에서 물의 사용량과 발전력과의 관계는 $v_i = h(q_{hi})$ 의 함수로 표현되며 본 연구에서는 2차함수로 정의한다.

2.2 최적해와 잠재가격

수화력협조 문제에 대한 라그랑지안 함수를 나타내면 다음 식(2)와 같이 등식과 부등식 제약조건이 라그랑지안 변수 λ_j, γ 와 결합되어 표현된다.

$$L = \sum_{i=1}^I n_i \cdot F(q_{ti}) + \sum_{i=1}^I \lambda_i (D_i - q_{hi} - q_{ti}) + \gamma (\sum_{i=1}^I n_i v_i - V) \quad (2)$$

라그랑지안의 미분을 통한 최적조건식을 정리하면 다음 식(3)을 얻게 된다.

$$\frac{dF(q_{ti})/dq_{ti}}{dh(q_{hi})/dq_{hi}} = \gamma n_i \quad i=1, \dots, I \quad (3)$$

식(3)은 시구간 개수인 I 개의 방정식을 나타내며 라그랑지안 변수 γ 는 I 개의 식에서 같은 값을 갖는다. 즉 전체 구간에서 γ 의 값이 일정할 때가 최적임을 뜻한다. 이를 수력 발전에 대한 잠재가격(shadow price)이라 하며 수력발전기의 단위 발전력 증가에 필요한 저수 사용량과 화력발전기 한계비용의 비율을 의미한다. 따라서 잠재가격은 물의 이용 가치를 화력발전기의 연료 가치와 비교한 환산비로 이해할 수 있고 최적의 수화력협조는 저수된 물의 가치가 일정하게 사용될 때임을 알 수 있다.

하지만 경쟁형 전력시장에서는 이러한 수화력협조는 기대할 수 없다. 발전회사는 자신의 이득을 극대화시키기 위해 실제의 발전비용과는 다른 전략적 입찰함수를 사용하기 때문이다. 시장에서는 다만 구조의 설계와 규칙의 제정을 통해서 실제의 비용특성에 가까운 공급전략을 사용하도록 유도할 뿐이다.

3. 수력발전의 경쟁적 입찰전략

3.1 최적화문제의 표현

기업이 생산한 재화를 시장에서 경쟁적으로 판매할 때의 가격형성과 생산량 및 잉여(surplus)의 배분을 해석하는 모형으로는 Cournot, Bertrand, Stackelberg, 그리고 공급함수(Supply Function)모형 등이 있다. 이러한 모형 중에서 전력 시장에서의 입찰과정과 발전비용특성을 고려할 때 전력시장 분석에 가장 적합한 것은 공급함수모형이다[9].

공급자의 공급의사를 나타내는 공급함수는 발전시장에서 입찰함수로 사용되기 때문에 입찰함수(Bid function)라고도 한다. 입찰함수는 1차함수로 표현되는 발전기의 한계비용함수에서 절편 혹은 기울기를 전략적으로 선택하여 정해진다. 이와 같은 입찰함수의 전략 파라미터는 여러 가지 형태가 가능하지만 기울기 전략을 선택하는 것이 게임의 균형에 해당된다는 연구결과가 있다[10]. 따라서 본 연구에서는 입찰함수의 기울기를 전략 파라미터로 하는 공급함수기법으로 수화력의 발전경쟁을 모형화 한다.

여기서도 2절에서와 같이 화력과 수력 각 1기씩이 경쟁하는 경우를 정식화하며 발전기의 숫자가 증가해도 본 연구결과는 그대로 적용된다. 화력발전기(G_t)의 한계비용함수를 $dF/dq_t = b_t + m_t q_t$ 라 하고 수력발전기(G_h)의 발전비용은 영이며 저수의 이용특성은 $h(q_h) = b_h q_h + 0.5 m_h q_h^2$ 로 가정한다. 따라서 G_t 는 s_t 를 파라미터로 하는 $p_t = b_t + s_t q_t$ 를 입찰함수로 사용하고 G_h 는 s_h 를 파라미터로 하여 $p_h = s_h q_h$ 를 입찰함수로 사용한다. 한편 부하특성은 1차의 수요함수로 나타낸다.

발전시장에서의 거래는 공급과 구매의 입찰조건을 바탕으로 시장운영자(market operator, MO)에 의해 정해지는데 다음 식(4)와 같이 사회적 후생(social welfare, SW)이라 불리는 시장거래가치를 극대화하는 조건으로부터 거래량과 가격이 결정된다. 이때의 공급은 입찰함수를 의미하고 구매는 수요함수를 뜻한다.

$$\max_q SW(q, s) = B(q) - \bar{C}(q, s) \quad (4)$$

여기서 B 는 소비자의 만족가치(Benefit)를 나타내는데 이는 수요함수와 총공급량으로 계산되며[1], \bar{C} 는 공급자의 입찰함수를 한계비용함수로 간주하여 계산한 유사 발전비용이다.

한편 공급자 입장에서는 s 의 선택에 따라 MO에서의 최적화 결과가 달라지고 기업의 이득이 변하기 때문에 s 를 변수로 하는 이득극대화 문제를 계산하게 된다. 이를 나타내면 식 (5)와 같다.

$$\max_s \pi(q, s) = pq - C(q, s) \quad (5)$$

여기서 p 는 거래가격으로서 pq 는 전력공급에 따른 매출액, C 는 실제의 발전비용을 나타낸다.

공급기업이 이득을 극대화하기 위해서는 $\partial \pi / \partial s$ 식을 구해야 하는데 이 때 경쟁상대의 입찰 파라미터에 영향을 받게 되어 상호간의 입찰전략에 따라 이득이 변하는 게임 현상이 나타난다. 따라서 발전기업은 최종적으로 내쉬균형(Nash Equilibrium, NE) 전략에 해당되는 입찰 파라미터를 선택하게 된다[12].

3.2 2단계 최적화조건

또한 식(5)의 최적화를 수행하는 과정에서 거래량(q)이 식(4)를 통해 결정되므로 해를 구하기 위해서는 두 단계의 최적화 문제가 연계되어야 한다. 이런 문제를 2단계(Bi-level) 최적화라 하며[11] 전력시장에서 내쉬균형 전략을 구하는 과정에서 일반적으로 나타나는 문제이다.

입찰에서 제시된 자료를 대상으로 MO가 전력거래의 결정 과정에서 계산하는 식(4)는 다음과 같다.

$$SW(q, s) = \sum_{i=1}^I [B(q_h, q_i) - \bar{C}_h(q_h, s_h) - \bar{C}_i(q_i, s_i)] \quad (8)$$

이에 대한 최적조건의 유도는 다음 식(9)와 같다.(i=1,..., I)

$$\partial SW / \partial q_{hi} = b_{0i} - m_{0i}(q_{hi} + q_{ti}) - s_{hi}q_{hi} = 0 \quad (9a)$$

$$\partial SW / \partial q_{ti} = b_{0i} - m_{0i}(q_{hi} + q_{ti}) - (b_{ti} + s_{ti}q_{ti}) = 0 \quad (9b)$$

여기서 b_0 와 m_0 는 수요함수 $p = b_0 - m_0q$ 에서의 절편과 기울기이다.

수력발전에서의 이득극대화는 다음과 같이 이득과 저수량 제약조건이 결합된 라그랑지안이 이용된다.

$$L_h = \sum_{i=1}^I s_{hi}q_{hi}^2 + \gamma [V - \sum_{i=1}^I h(q_{hi})] \quad (10)$$

이에 대한 최적조건의 유도는 다음 식(11)과 같다.(i=1,...,I)

$$\partial L_h / \partial s_{hi} = q_{hi}^2 + 2s_{hi}q_{hi} \partial q_{hi} / \partial s_{hi} - \gamma \partial q_{hi} / \partial s_{hi} \partial h / \partial q_{hi} = 0 \quad (11)$$

여기서도 최적조건은 γ 가 전체 구간에서 일정하게 유지될 때임을 알 수 있다.

화력발전에서의 이득극대화는 다음 식(12)의 이득과 (13)의 극대화 조건으로 정리된다.

$$\pi(q_i, s_i) = \sum_{i=1}^I s_{ti}q_{ti}^2 - \sum_{i=1}^I 0.5m_{ti}q_{ti}^2 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial s_{ti}} = q_{ti}^2 + (2s_{ti} - m_{ti})q_{ti} \frac{\partial q_{ti}}{\partial s_{ti}} = 0 \quad (13)$$

이상과 같이 전력시장 참여자인 MO와 수력발전회사, 화력발전회사는 자신의 목표를 극대화하는 조건에 부합하는 선택을 할 것이다. 즉 MO는 식(9a)와 (9b)를 만족하는 q_h , q_i 를 정하고, 수력발전은 식(11)에 의해 s_h 를, 화력발전은 식(13)에 의해 s_i 를 선택하려 한다.

3.3 내쉬균형계산

앞에서 유도한 식(11)과 (13)에서 기울기전략(s)에 대한 발전량(q)의 민감도가 포함되는데 이는 위의 식(9a)와 (9b)를 미분하여 구해지며 정리하면 다음 식(14)와 같다.

$$\partial q_{hi} / \partial s_{hi} = -(m_{0i} + s_{ti}) / \Delta_i \cdot q_{hi} \quad (14a)$$

$$\partial q_{ti} / \partial s_{ti} = -(m_{0i} + s_{hi}) / \Delta_i \cdot q_{ti} \quad (14b)$$

$$\Delta_i = m_{0i}s_{hi} + s_{hi}s_{ti} + s_{ti}m_{0i}$$

앞의 식(14)를 대입하여 식(11)과 (13)을 정리하고 이를 식(9)와 어울려 나타내면 구간 i에서 다음 식(15)와 같은 4개의 연립방정식으로 표현된다. (i=1,...,I)

$$s_{hi}q_{hi} + m_{0i}q_{hi} + m_{0i}q_{ti} = b_{0i} \quad (15a)$$

$$s_{ti}q_{ti} + m_{0i}q_{ti} + m_{0i}q_{hi} = b_{0i} - b_{ti} \quad (15b)$$

$$s_{hi}s_{ti}q_{hi} + m_{0i}s_{hi}q_{hi} - (\gamma m_h + m_{0i})s_{ti}q_{hi} - \gamma m_h m_{0i}q_{hi} - \gamma b_h s_{ti} = \gamma m_{0i} b_h \quad (15c)$$

$$s_{hi}s_{ti} - (m_{0i} + m_{ti})s_{hi} + m_{0i}s_{ti} = m_{0i}m_{ti} \quad (15d)$$

따라서 전체 구간을 고려하면 방정식은 4×I 개이며 식(1b)에서의 저수량 조건까지 포함하면 4×I+1 개이다. 한편 변수도 I 개 구간에서의 (q_h, q_i, s_h, s_i)와 전 구간에서 일정한 γ 를 포함하면 개수는 방정식과 동일하다. 전체 방정식을 풀기 위해서는 비선형연립방정식의 해법이 필요한데 뉴턴법 등이 사용 가능하다.

3.4 과점형 잠재가격

앞의 2.2절에서 살펴본 바와 같이 수직통합형 수화력협조는 발전에 사용되는 물의 가치가 화력발전의 한계연료비용으로 환산되어 잠재가격이 일정한 값을 가질 때이다. 이는 완전경쟁(perfect competition)일 때에도 성립한다. 하지만 과점(oligopoly) 경쟁인 경우에는 식(11)에서의 같이 물의 가치가 전력시장 판매에 대한 한계이득으로 환산되어 진다.

본 연구에서는 이를 과점형 잠재가격이라 칭하고 식(3)의 정의에 따라 계산된 것을 통합형 잠재가격이라 부른다. 과점의 균형상태에서 과점형 잠재가격은 일정하게 분포하겠지만 통합형 잠재가격은 일정하지 않을 것이다. 전력시장의 효율성 극대화 측면에서 볼 때 통합형 잠재가격이 균일한 분포일 때를 이상적인 상태라 할 수 있다. 이것의 편차가 심할수록 이상적인 상태에서 멀어진다고 할 수 있다. 즉 시장지배력(Market Power)이 증가하는 것으로 해석된다[12].

시장지배력이란 몇 가지로 정의될 수 있으나 본 연구에서는 “한계비용 보다 높은 가격으로 완전경쟁에서의 공급량보다 적은 공급을 유지할 수 있는 능력”이라는 정의[12]를 사용한다. 시장지배력의 정도를 나타내기 위해 사례연구에서는 사회적 후생을 계산하여 완전경쟁에서의 값과 크기를 비교한다. 또한 저수량에 따른 시장지배력 변화를 살펴보고 수요의 탄력성은 어떤 영향을 주는지에 대해서도 분석한다.

4. 입찰전략 사례 및 분석

4.1 대상 모형

사례연구 대상은 2인(P_1, P_2) 게임으로서 P_1 은 수력발전기(G_h)를 P_2 는 화력발전기(G_t)를 운용하여 발전입찰시장에서 이득을 극대화하는 모형이다. 송전선제약은 고려하지 않으며 발전기 G_h 의 비용은 영이고 G_t 의 한계비용특성은 $5 + 0.45 q_t$ 으로 가정한다. 수력발전에서 발전력과 이용한 물의 양의 관계는 $h(q_h) = 4q_h + 0.01q_h^2$ 로 가정한다.

수력발전에서 이용가능한 물의 양 V는 2000이라 두고 계획기간은 8개 구간으로 분리한다. 부하의 수요함수는 $p = b_0 - m_0(q_h + q_t)$ 로 정의하며 각 구간에서의 수요함수는 다음 표1과 같다.

표 1 구간별 수요함수

Table 1 Load Pattern by Periodic Demand Functions

구간(j)	1	2	3	4	5	6	7	8
b_{0j}	170	210	190	150	110	100	140	170
m_{0j}	0.50	0.45	0.40	0.50	0.55	0.60	0.40	0.50

경쟁형 전력시장에서 사회적후생이 극대가 되는 이상적인

모형은 완전경쟁 상태이다[12]. 따라서 완전경쟁의 내쉬균형 상태를 시장의 효율성이 극대가 되는 상태라 할 수 있으며 본 연구에서는 수력발전이 포함된 과점상태의 비교 기준으로 삼는다.

완전경쟁의 해석은 다음 식(16)과 같이 화력기의 실제 비용함수를 반영한 극대화와 수량의 제약조건을 반영한 최적 계산으로 수행된다.

$$\begin{aligned} \max_q \quad & \sum_{i=1}^I [B(q_h, q_t) - C_i(q_i)] \\ \text{s.t.} \quad & V = \sum_{i=1}^I h(q_{hi}) \end{aligned} \quad (16)$$

4.2 균형전략 결과 분석

완전경쟁에서의 균형상태를 계산하여 각 구간에서의 발전력, 시장가격, 사용된 수량, 그리고 잠재가격을 나타내면 다음 표2와 같다. 구간 5,6에서는 수력발전은 하지 않고 화력 발전만 이루어지는데 이는 계산된 잠재가격으로 설명이 된다. 구간 5,6을 제외한 전 구간에서 잠재가격은 13.40이고 5,6 구간에서는 이보다 낮은 값을 갖는다. 즉 5,6 구간에서는 물의 가치가 낮아 발전량을 줄이고 상대적으로 다른 구간에서는 발전력을 높이는 것이 효율적이라는 경제적 신호인 것이다. 따라서 더 이상 줄일 수 없는 현재의 상태가 최적상태인 것이다. 수요가 전반적으로 낮고 가격탄력성이 낮은 구간에서는 수력발전은 경제성이 낮은 것으로 해석할 수 있다.

표 2 완전경쟁모형의 균형상태

Table 2 Equilibrium States of Perfect Competition Model

구간	1	2	3	4	5	6	7	8
q _h	58.57	109.4	102.9	39.80	0	0	47.69	58.57
q _t	142.9	173.1	169.2	131.7	105.0	90.48	136.4	142.9
가격	69.29	82.90	81.16	64.26	52.25	45.71	66.37	69.29
사용 수량	268.6	557.0	517.3	175.0	0	0	213.5	268.6
잠재가격	13.40	13.40	13.40	13.40	13.06	11.43	13.40	13.40

반면 발전력 입찰시장에서 입찰함수의 기울기를 전략적으로 선택하는 과점경쟁 모형에서는 수력발전의 운용전략이 이와는 다르게 나타난다. 내쉬균형에서 입찰함수의 기울기 (s_h, s_t), 발전량, 가격 등을 정리하면 다음 표3과 같다. 과점형 잠재가격은 13.59로서 전 구간에서 동일하며 통합형 잠재가격은 구간마다 차이를 보인다. 완전경쟁과 과점의 균형 상태에서 구간별 발전력과 시장가격, 잠재가격을 비교하여 나타내면 다음 그림1,2와 같다.

표 3 과점경쟁모형의 균형상태

Table 3 Equilibrium States of Oligopoly Model

구간	1	2	3	4	5	6	7	8
S _h	1.495	1.126	1.139	1.762	3.77	6.23	1.634	1.495
S _t	0.825	0.772	0.746	0.839	0.93	0.998	0.771	0.825
q _h	59.65	95.34	89.65	46.19	17.25	9.74	49.49	59.65
q _t	102.1	132.7	130.1	91.01	64.54	55.82	98.35	102.1
가격	89.15	107.4	102.1	81.40	65.02	60.67	80.86	89.15
사용 수량	274.2	472.2	439.0	206.1	71.96	39.91	222.5	274.2
잠재가격	9.81	10.96	10.97	9.33	7.84	7.18	9.87	9.81

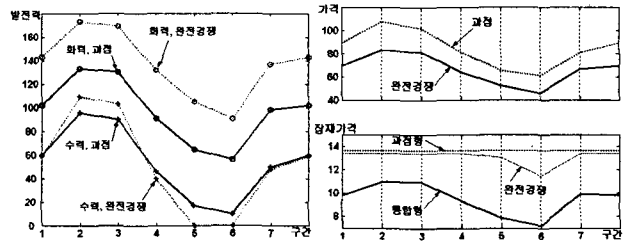


그림 1 수력과 화력의 발전력 비교

Fig. 1 Quantities of hydro and thermal generation

그림 2 시장가격 및 잠재가격의 비교

Fig. 2 Market Prices and Shadow Prices

시장가격은 완전경쟁보다 과점에서 높게 형성되는 반면 공급량은 과점에서 더 적다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그림1에서 화력기의 발전력과 그림2에서의 시장가격은 이러한 일반적 현상을 그대로 보여준다.

그림1의 구간 5,6에서 완전경쟁의 경우에 수력발전을 하지 않은 반면 과점인 경우에는 입찰에 참여하여 발전을 하게 된다. 또한 과점의 수력발전력 분포를 보면, 수요가 크고 가격 탄력성이 큰 구간 2,3에서 완전경쟁에 비해 공급을 줄이는 반면, 수요가 작고 가격탄력성이 작은 구간 5,6에서 공급을 늘이는 것을 알 수 있다.

수자원 이용의 효율성 검토는 잠재가격의 분석을 통해 가능하다. 그림2에 보이는 완전경쟁 잠재가격은 가장 효율적인 이용가치로 볼 수 있으며 과점형은 수력발전 회사의 이윤추구 측면에서 최적화한 것으로서 한계이득의 가치를 나타낸다. 따라서 과점형 잠재가격이 높다고 해서 보다 효율적으로 이용되고 있는 것은 아니다. 오히려 수자원의 공익적인 가치는 화력기의 한계비용으로 환산된 통합형 잠재가격으로 계산된다. 따라서 그림2에서 수자원의 이용 효율성은 과점의 경우에 비해 줄어드는 것을 알 수 있다.

4.3 시장효율성 비교

표3에서의 시장 결과에 대해 사회적 후생을 계산하면 완전경쟁과 과점에서 각각 145400, 85597이 된다. 과점에서 약 60% 정도로 감소하므로 수력발전기가 포함된 과점시장은 시장지배력이 있다고 볼 수 있다. 하지만 발전기가 공익시설이 아닌 한 이러한 현상은 당연한 것이다. 다만 시장지배력의 정도가 시장의 여건과 발전비용의 특성에 맞게 형성되는가가 중요한 문제가 된다.

본 연구에서는 표3에서 나타난 시장지배력의 정도가 시장 여건 및 발전시스템의 특성에 따라 어떻게 변하는지를 고찰한다.

표 4 저수량 변화에 따른 균형상태

Table 4 Equilibrium States in Accordance with Changes in Water Volume

저수량	1500	1800	2000	2200	2500	2800	3000	3200
γ _{oligo}	16.01	14.51	13.59	12.73	11.53	10.43	9.75	9.11
γ _{perf}	15.01	13.98	13.40	12.87	12.18	11.54	11.16	10.80
π _{hydro}	32452	36832	39500	41981	45379	48419	50261	51966
π _{thermal}	51193	48420	46654	44950	42504	40183	38701	37268
SW _{oligo}	80382	85597	88953	92219	96957	101520	104460	107340
SW _{perf}	137440	142450	145400	148220	152250	156070	158500	160850

다음 표4는 4.1절에서의 시장특성에서 저수량을 1500 ~ 3200 사이에 변화시키면서 과점의 내쉬균형을 구한 것이다. 잠재가격은 과점형(γ_{oligo})과 완전경쟁(γ_{perf}), 이득은 과점에서의 수력기(π_{hydro})와 화력기($\pi_{thermal}$)를 비교하였으며 사회적 후생은 과점(SW_{oligo})과 완전경쟁(SW_{perf})을 비교하여 그림3에 나타낸다.

그림3에서 잠재가격이 저수량 증가에 따라 감소하는데 이는 한계효용 체감의 원리에 비추어 당연한 것이다. 과점형에서의 변화 폭이 커지는 것은 이득을 위한 전략적 선택의 결과가 좀더 민감하게 작용하는 것으로 해석된다. 이득의 비율은 $\pi_{hydro}/(\pi_{hydro} + \pi_{thermal})$ 로 계산한 것으로 저수량이 증가함에 따라 수력발전기에 의한 이득이 증가함을 알 수 있다.

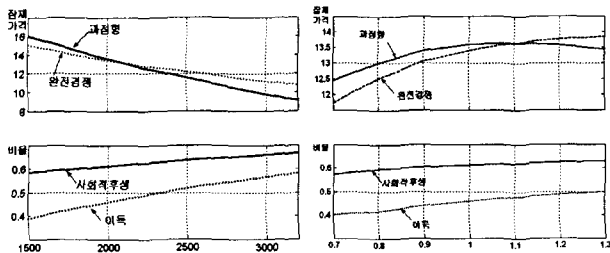


그림 3 저수량 변화에 따른 시장특성 분석
Fig. 3 Market Analysis in Accordance with Changes in Water Volume

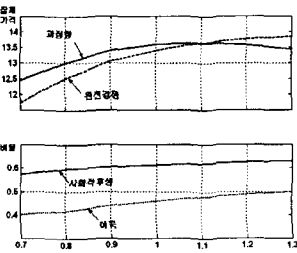


그림 4 수력발전 특성에 따른 시장특성 분석
Fig. 4 Market Analysis in Accordance with Changes in Hydro Unit Performance

사회적 후생의 비율은 SW_{oligo}/SW_{perf} 로 계산한 것으로 시장지배력과 밀접한 관계가 있다. 이 값이 작을수록 완전경쟁의 결과에서 멀어져 시장지배력이 커지며 이 값이 클수록 시장의 효율성은 완전경쟁에 가깝게 증가한다. 따라서 저수량이 많을수록 시장지배력이 감소함을 알 수 있다.

다음은 저수량은 2000으로 유지하면서 수력발전소에서 물 사용량과 발전력의 관계인 $h(q_h) = b_h q_h + 0.5 m_h q_h^2$ 함수를 변화시키면서 시장특성을 살펴본다. 파라미터 r 을 사용하여 함수의 계수를 각각 $m_h' = r \cdot m_h$, $b_h' = b_h/r$ 로 변경하며 파라미터 r 은 0.7~1.3 범위에서 변화시킨다. r 값이 크면 발전력 증가에 따라 물의 사용이 급증하게 되고 r 값이 작으면 작은 발전력에도 물의 사용은 크지만 발전력 증가에 따라 물 사용의 증가는 크지 않다.

그림 4에서 파라미터가 증가함에 따라 완전경쟁의 잠재가격은 수력기의 특성에 의해 상승하지만 과점형에서는 증가 추세가 지속되지 않음을 알 수 있다. 수력기 이득의 비중이 증가하고 사회적 후생도 조금씩 증가하는데 이는 $b_h' = b_h/r$ 가 크게 작용하여 발전에 필요한 물의 사용이 효율적으로 바뀌기 때문으로 해석된다.

다음은 저수량은 2000으로 유지하면서 부하특성인 수요함수($p = b_0 - m_0 Q$)를 변화시키면서 시장특성을 살펴본다. 파라미터 r 을 사용하여 함수의 계수를 $m_0' = r^2 \cdot m_0$, $b_0' = r \cdot b_0$ 로 변경하며 파라미터 r 은 0.85~1.15 범위에서 변화시킨다. r 값이 1.0 보다 클수록 수요함수에서의 수직축 절편은 증가하고 수평축 절편은 감소하여 가격탄력성은 감

소하게 된다. 반면 r 값이 작아질수록 반대로 작용하여 가격탄력성은 증가한다.

가격탄력성을 변화시키면서 계산한 결과, 잠재가격과 사회적 후생, 이득의 비율에는 큰 변동이 없었다. 사회적 후생이란 소비자의 효용(Benefit)에서 생산비용을 뺀 값으로 계산되기 때문에 수요함수에 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 파라미터 r 을 통해 임의로 수요함수를 변화시키는 방법은 실제 부하에서의 소비효용을 나타내기에는 적합하지 않다.

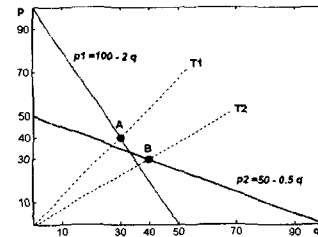


그림 5 가격탄력성이 다른 수요함수의 비교
Fig. 5 Demand Curve Comparisons with Different Elasticities

그림5에서 이러한 이유를 살펴본다. 수요함수 p_1 에서의 균형점은 점A(30,40), 수요함수 p_2 에서의 균형점은 점B(40,30)이라 가정한다. 소비자효용은 p_1 에서 $\int_0^{30} p_1 dq = 2100$, p_2 에서

$\int_0^{40} p_2 dq = 1600$ 로 계산된다. 계산된 수치만을 생각하면 균형점

A의 효용이 크지만 실제로는 점B에서 가격이 낮고 발전량이 더 크므로 소비자에게 더 이로운 상태라 할 수 있다. 즉 수요함수를 1차함수로 모형화할 때 수직축에 가까운 곳에서 높은 적분값이 발생하게 되어 실제의 시장지배력 의미와는 거리가 멀게 된다.

수요함수 가격탄력성을 변경할 때의 모형화 문제를 해결하기 위해 여기서는 새로운 평가지수를 도입한다. 앞에서의 점A와 점B의 비교에서처럼 소비자는 가격이 낮을수록 그리고 공급전력이 증가할수록 더 큰 만족을 느낀다. 따라서 균형점이 그림5에서 오른쪽 아래부분으로 이동할수록 시장지배력이 낮아지고 왼쪽위부분으로 갈수록 시장지배력은 높아진다. 이를 나타내기 위해 균형점과 원점과의 기울기를 새로운 시장지배력 지수로 사용한다. 새로운 지수에 의하면 점A를 지나는 직선 T1의 기울기가 점B를 지나는 T2의 기울기보다 크므로 시장지배력이 더 큰 것으로 해석된다.

표 5 수요의 가격탄력성 변화에 따른 시장특성 분석
Table 5 Market Analysis in Accordance with Changes in Demand Elasticity

파라미터(r)		0.85	0.9	0.95	1.0	1.05	1.1	1.15
과점	평균가격	84.67	86.58	88.31	89.88	91.28	92.54	93.66
	평균발전력	154.73	153.48	152.04	150.45	148.76	146.99	145.19
	기울기	0.547	0.564	0.581	0.597	0.614	0.630	0.645
완전경쟁	평균가격	71.49	71.37	71.01	70.45	69.72	68.85	67.86
	평균발전력	190.20	190.13	189.55	188.56	187.20	185.54	183.64
	기울기	0.376	0.375	0.375	0.374	0.372	0.371	0.370

가격탄력성의 파라미터를 변화시키면서 각 균형점에서의 평균가격과 평균발전량을 계산하여 이를 완전경쟁에서의 수치고 비교하여 나타내면 다음 표5와 같다. 발전력은 탄력성이 낮을수록 과점과 완전경쟁에서 모두 감소하지만 가격은 상반된 특성으로 과점에서는 증가하고 완전경쟁에서는 감소한다. 이러한 경우에 본 연구에서 제안한 균형점에서의 가격/발전력의 기울기를 계산하면 과점에서는 기울기가 증가하는 반면 완전경쟁에서는 작은 변화로 감소함을 알 수 있다.

따라서 수요의 가격탄력성이 낮아질수록 수력기를 포함한 과점경쟁에서 시장지배력은 증가하는 것으로 해석이 가능하다. 이러한 정량적인 분석결과는 가격탄력성이 높을수록 시장지배력을 억제시킬수 있다는 일반적인 인식과도 일치한다.

5. 결 론

전력시장에서의 발전력 경쟁에 수력발전기의 입찰전략을 해석하기 위한 정식화를 수립하고 내쉬균형을 계산하기 위한 최적화와 계산기법을 제안하였다. 기존의 수직통합형에서 사용되던 잠재가격의 개념은 경쟁시장에서는 더 이상 사용될 수가 없고 이 대신에 수력발전을 통한 한계이득으로 환산된 새로운 잠재가격 개념이 나타남을 유도하였다.

사례연구를 통하여 수력기의 전략은 가격 탄력성이 큰 구간에서 공급을 줄이고, 가격탄력성이 작은 구간에서는 공급을 늘이는 것을 확인하였다. 이러한 현상을 시장지배력으로 해석하기 위해 사회적후생을 계산하여 비교하였다. 또한 저수량과의 관계를 분석하여 저수량이 많을수록 시장지배력이 감소하고 수력발전소에서 물의 이용특성이 향상될수록 시장지배력이 감소함을 알게 되었다. 부하의 가격탄력성 변화에 따라서는 새로운 지수를 정의함으로써 탄력성이 높아질수록 시장지배력이 감소하는 결과를 얻었다. 이는 부하 가격탄력성이 전력시장의 안정을 위해 필요하다는 사실을 재확인시켜주는 것이다.

참 고 문 헌

[1] S. Stoft, "Using Game Theory to Study Market Power in Simple Networks," *IEEE Tutorial on Game Theory in Electric Power Market*, IEEE Press TP-136-0, pp.33-40, 1999.

[2] K. H. Lee and R. Baldick, "Tuning of Discretization in Bimatrix Game Approach to Power System Market Analysis." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.18, No.2, pp.830-836, May 2003.

[3] G. Borichevsky, "Bidding Mechanism for realizing hydro efficiencies in market operations," *IEEE PES Summer Meeting*, Vol.3, p.1301, July 2002.

[4] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, Inc. 1996.

[5] A. Oliveira, A.C.G. Melo, R.C. Souza, "Optimum Price Bidding Strategy in the Short-term Market of Hydro-Dominated System," *International Conference on*

Probabilistic Method to Power Systems, pp.373-379, Sept. 2004.

[6] C. Gonzalez, J. Juan, "Reliability analysis for systems with large hydro resources in a deregulated electric power market," *EEE Trans. on Power Systems*, Vol.20, No.1, pp.90-95, Feb. 2005.

[7] A.J. Coneo, J.M. Arroyo, J. Contrares, "Self-scheduling of a hydro producer in a pool-based electricity market," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.17, No.4, pp.1265-1272, Nov. 2002.

[8] N. Lu, J.H. Chow, A. Desrochers, "Pumped-Storage hydro-Turbine Bidding Strategies in a Competitive Electricity Market," *EEE Trans. on Power Systems*, Vol.19, No.2, pp.834-841, May 2004.

[9] R. Baldick, R. Grant, and E. Kahn, "Theory and Application of Linear Supply Function Equilibrium in Electricity Markets," *Journal of Regulatory Economics*, Vol.25, No.2, pp.143-167, March 2004.

[10] C.H. Cho, and K.H. Lee, "A Study on the Selection of a Bidding Parameter at the Bidding Function Model in an Electricity Market," *Transactions of KIEE*, Vol.53, No.11, pp.630-635, Nov. 2004.

[11] J. D. Weber and T. J. Overbye, "A Two-Level Optimization Problem for Analysis of Market Bidding Strategies," *IEEE PES Summer Meeting*, Vol.12, pp.682-687, 1999.

[12] D.W. Carlton, J.M. Perloff, *Modern Industrial Organization*, Addison-Wesley, 2000.1.

저 자 소 개



이 광 호(李 光 浩)

1965년 12월 22일 생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년 전력연구원 위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 공대 전기공학과 부교수.

Tel : 02-709-2868

E-Mail : khlee@dku.edu