

Analysis on Incomplete Information in an Electricity Market using Game Theory

申 載 弘[†] · 李 光 浩^{*}
(Jae-Hong Shin · Kwang-Ho Lee)

Abstract - Oligopoly differs from perfect competition and monopoly in that a firm must consider rival firms' behavior to determine its own best policy. This interrelationship among firms is the issue examined in this paper. In the oligopoly market, the complete information market means that each producer has full information about itself, the market, and its rivals. That is, each producer knows the market demand function, its own cost function and the cost functions of rivals. On the other hand, the incomplete information market means that in general each producer lacks full information about the market or its rivals. Here, we assume that each firm doesn't know the cost functions and the strategic biddings of its rivals. The main purpose of this paper is to analyze firm' strategic behaviors and equilibrium in an electricity market with incomplete information. In the case study, the complete information market and the incomplete market are compared at the Nash Equilibrium from the viewpoints of market price, transaction quantities, consumer benefits, and Social Welfare.

Key Words : Incomplete Information, Nash Equilibrium, Market Price, Consumer Benefits, Social Welfare

1. 서 론

극적 체제로 재편되었다. 현재는 구조개편의 초기 단계로 원가주의에 근거하여 전력가격을 결정하는 변동비반영시장(Cost Based Pool; CBP)을 운영하고 있다[1]. 하지만 향후 가격 입찰방식 시장(Price-Bidding Generation Pool; PBPG)이 구축되면 전력가격은 발전사업자의 전략적인 입찰함수에 의해 결정된다. 그러므로 PBPG 시장에서는 경쟁사업자의 발전특성 데이터를 정확히 알기란 어렵다.

일반적으로 경쟁사업자의 발전특성을 알 수 있는 전력시장을 완비정보(Complete Information) 전력시장(이하 완비시장)이라하고 발전특성을 알 수 없는 전력시장을 불완비정보(Incomplete Information) 전력시장(이하 불완비시장)이라 한다[2-8].

발전사업자가 입찰함수를 결정하는데 있어 완비시장과 불완비시장은 많은 차이가 있다[3-8]. 입찰함수를 결정하기 위해서는 경쟁으로 나타나는 균형 상태를 예측하는 것이 필요한데 균형은 입찰에 참여한 모든 발전사업자의 이득극대화 목적과 시장운영자의 사회적 후생(Social Welfare; SW) 극대화 목적이 만족할 때 나타난다. 그러므로 완비시장에서는 2 단계 최적화 과정(Bi-Level Optimization)을 통해 균형 상태

를 예측할 수 있지만 불완비시장에서는 경쟁사업자의 이득을 알 수 없기 때문에 균형 상태를 예측하는 것이 어렵다[9,10].

기존 연구에서는 경쟁사업자가 제시할 수 있는 모든 입찰함수를 예상하고 확률적으로 이득이 가장 높게 나타나는 입찰함수를 선택한다[4,6]. 하지만 현실적으로 발전사업자는 입찰을 통해 나타나는 시장실적을 이용하여 경쟁사업자의 발전특성을 추정하기 위해 노력할 것이다. 또한 추정된 정보를 바탕으로 입찰함수를 수립할 것이다.

과점시장을 해석하는 모형 중, 공급함수모형은 직접 공급함수와 수요함수를 입찰하기 때문에 불확실한 부하특성을 반영할 수 있다. 또한 전력의 가격과 발전량을 동시에 고려하여 입찰할 수 있기 때문에 발전사업자의 전략적인 행태를 분석하는데 유용하게 사용된다[3].

불완비정보는 발전사업자가 이득에 영향을 미치는 정보공개를 원하지 않기 때문에 나타난다. 공급함수 모형에서 발전사업자의 이득은 전력가격과 거래량, 한계비용함수, 입찰전략으로 결정된다[9,10]. 이들 정보 중 전력가격과 거래량은 시장운영자가 결정하는 것이므로 발전사업자의 고유한 정보로 볼 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 한계비용함수와 입찰전략의 불완비성을 고려하여 발전사업자의 경쟁을 해석한다.

본 연구에서는 정보의 공개 범위에 따라 전력시장을 구분한다. 첫째는 경쟁사업자의 한계비용함수와 입찰전략을 모두 아는 완비시장이고 둘째는 한계비용함수는 모르지만 입찰전략을 알고 있는 한계비용 불완비시장이다. 그리고 셋째는 한계비용함수와 입찰전략을 모두 모르는 입찰전략 불완비시장이다. 또한 불완비시장에서 한계비용함수를 추정하는 방법을 제안하고 추정된 한계비용함수를 통해 입찰전략이 수립되는 방법을 제안한다.

† 교신저자, 正 會 員 : 檀 國 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
E-mail : sjh138@dku.edu

* 正 會 員 : 檀 國 大 電 氣 工 學 科 副 教 授
接受日字 : 2006年 2月 15日
最終完了 : 2006年 4月 12日

2. 정보에 따른 전력 시장의 구분

경쟁사업자의 한계비용함수에 대해 이득을 극대화시키는 입찰전략은 잘 알려져 있다[9,10]. 그러므로 표 1과 같이 한계비용함수가 시장에서 공개되는지 여부에 따라 완비시장과 불완비시장으로 구분한다. 그리고 불완비시장은 한계비용함수와 입찰전략을 모두 모르는 시장과 한계비용함수만 모르는 시장으로 구분한다. 단, 전력의 거래량, 거래가격 그리고 수요특성은 발전사업자가 항상 알고 있는 것으로 한다.

표 1 전력시장에서 공개되는 정보범위

Table 1 Public information in an electricity market

구분	명칭	정보공개	정보비공개
1	완비시장	한계비용함수	x
2	한계비용 불완비시장	입찰전략	한계비용함수
3	입찰전략 불완비시장	x	한계비용함수, 입찰전략

완비시장에서 x는 경쟁사업자에 관련된 모든 정보를 알고 있는 것을 의미하고 입찰전략 불완비시장에서 x는 한계비용함수와 입찰전략을 모두 모르는 상태를 의미한다.

발전사업자는 이득을 극대화시키는 입찰전략을 결정하고 시장운영자는 입찰전략을 통해 시장거래가치를 극대화시키는 전력거래를 결정한다. 그러므로 발전사업자가 입찰전략을 결정하기 위해서는 경쟁사업자의 입찰전략을 고려해야 한다.

완비시장은 경쟁사업자의 한계비용함수를 알고 있는 전력시장을 의미한다. 한계비용함수를 알고 있다는 것은 이득함수를 알고 있다는 것과 같은 의미이므로 경쟁사업자의 이득극대화 목적과 자신의 이득극대화 목적을 동시에 고려하여 균형상태의 입찰전략을 선택할 수 있다.

반면 불완비시장에서는 경쟁사업자의 이득함수를 알 수 없으므로 발전사업자가 원하는 이득을 얻기 위해서는 시장에서 이용 가능한 정보를 최대한 활용하여 한계비용함수를 추정해야 한다.

3. 완비시장

정식화 모형은 발전사업자 G_1, G_2 가 공급경쟁에 참여한 것을 대상으로 하며 송전선로계약 등의 제약조건은 고려하지 않는다. 한계비용함수, 입찰함수 그리고 수요특성은 일차함수로 정의하며 입찰전략은 한계비용함수의 절편을 전략적으로 선택하는 모형을 사용한다. 발전사업자 i 의 한계비용함수, 입찰함수 그리고 수요특성을 표현하면 식 (1)~(3)과 같다.

$$\text{한계비용함수 : } C'_i(q_i) = m_i q_i + b_i \quad (1)$$

$$\text{입찰함수 : } \overline{C}'_i(q_i, k_i) = m_i q_i + k_i \quad (2)$$

$$\text{수요특성 : } D(\sum q_i) = b_0 - m_0 \sum q_i \quad (3)$$

q_i : 전력거래량, m_i : 한계비용함수의 기울기

b_i : 한계비용함수의 절편, k_i : 입찰전략

b_0 : 수요특성의 절편, m_0 : 수요특성의 기울기

시장운영자의 역할은 전력거래를 통해 사회적 후생(Social Welfare; SW)의 의미를 갖는 시장거래가치를 극대화시키는

것이다. 이를 수식으로 표현하면 식 (4)와 같은 최적화문제로 나타난다.

$$\max_{q_i} SW(k_i, q_i) = B(\sum q_i) - \sum \overline{C}'_i(k_i, q_i) \quad (4)$$

수요특성은 전력의 가격과 소비자의 전력구매량 관계를 의미한다. 즉, 전력구매량에 따라 얼마의 가격을 지불하겠나하는 의지로 소비자는 전력을 구매함으로써 지불하고자 했던 가격만큼의 만족을 얻을 수 있다. 때문에 소비자가 전력을 구매함으로써 얻는 만족정도(Benefit ; B)는 수요특성을 총거래량으로 적분함으로써 구할 수 있다. 식 (4)에서 \overline{C}'_i 는 시장운영자가 고려하는 발전비용을 의미하며 입찰함수 \overline{C}'_i 를 통해 결정된다.

SW를 극대화시키는 전력거래량은 $\partial SW / \partial q_i = 0$ 로 구할 수 있다. 이를 q_1, q_2 에 대해 정리하면, 식 (5)와 같은 전력거래량과 입찰전략 관계식이 유도된다[9,10].

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} &= \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} m_2 + m_0 & -m_0 \\ -m_0 & m_1 + m_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 - k_1 \\ b_0 - k_2 \end{pmatrix} \\ \Delta &= m_0 m_1 + m_1 m_2 + m_2 m_0 \end{aligned} \quad (5)$$

반면, 발전사업자는 전력거래를 통해 이득을 극대화시키는 입찰전략을 선택한다. 발전사업자의 이득은 식 (6)과 같이 총수입(Revenue)에서 발전비용을 뺀 값으로 계산된다.

$$\max_{k_i} \Pi_i(k_i, q_i) = p q_i - C_i(q_i, k_i) \quad (6)$$

여기서 p 는 전력가격을 의미한다. 그리고 C_i 는 실제발전비용을 의미하며 한계비용함수 C'_i 를 q_i 로 적분함으로써 구할 수 있다.

발전사업자는 $\partial \Pi_i / \partial k_i = 0$ 를 통해 이득을 극대화시키는 입찰전략을 선택할 수 있다. 편미분을 통해 계산된 입찰전략은 식 (7)과 같이 나타난다.

$$k_1 = \frac{m_0 m_2}{m_0 + m_2} q_1 + b_1, \quad k_2 = \frac{m_0 m_1}{m_0 + m_1} q_2 + b_2 \quad (7)$$

q_1, q_2 는 식 (5)와 같이 k_1, k_2 에 대해 표현할 수 있다. 그러므로 식 (5)과 식 (7)을 연립하여 k_1, k_2 에 대해 정리하면 식 (8)과 같은 균형상태의 입찰전략이 유도된다[9,10].

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} (m_2 + m_0)(\Delta + m_2 m_0) & -m_2 m_0^2 \\ -m_1 m_0^2 & (m_1 + m_0)(\Delta + m_1 m_0) \end{pmatrix}^{-1} \\ &\cdot \begin{pmatrix} \Delta(m_2 + m_0)b_1 + m_2^2 m_0 b_0 \\ \Delta(m_1 + m_0)b_2 + m_1^2 m_0 b_0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

균형상태의 입찰전략 k_i 는 경쟁사업자의 한계비용함수와 수요특성으로 구성되어 있다. 따라서 경쟁사업자의 한계비용함수를 알 수 있는 완비시장에서 발전사업자는 식 (8)을 이용하여 균형상태의 입찰전략을 결정할 수 있다.

4. 불완비시장의 입찰전략 선택

앞 절을 통해 이득이 극대화되는 입찰전략은 경쟁사업자의 한계비용함수에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 하지만 전력시장의 경쟁도입으로 인해 경쟁사업자의 한계비용함수를 정확히 알고 입찰전략을 수립하기란 어렵다.

발전사업자의 이득을 극대화시키는 입찰전략은 식 (7)과 식 (8)에 나타나 있다. 두 식은 어느 정보를 이용하여 수립되는지에 따라 구분된다. 식 (7)은 입찰을 통해 나타나는 전력거래량과 경쟁사업자의 한계비용함수가 이용되는 반면 식 (8)은 한계비용함수만으로 결정되는 식이다.

불완비시장에서 발전사업자가 경쟁사업자의 한계비용함수를 추정할 수 있는 중요한 정보는 입찰을 통해 결정되는 전력가격과 거래량이다. 본 연구에서는 전력거래량 정보를 이용하기 위해 식 (7)을 사용하여 입찰전략을 결정한다.

식 (7)에 나타난 전력거래량은 입찰전략이 제출되었을 때 알 수 있는 값이다. 그러므로 본 연구에서는 이전의 거래량을 사용하여 입찰전략을 수립한다. 또한 식 (7)의 입찰전략을 이용하기 위해서는 경쟁사업자의 한계비용함수 기울기를 알아야 한다. 하지만 불완비시장에서는 한계비용함수를 알 수 없으므로 추정 값을 사용하여 입찰전략을 수립한다.

입찰전략 결정과정을 완비시장과 비교하면 표 2와 같다.

표 2 입찰전략 계산식의 비교

Table 2 Computational relation comparisons for bidding parameters

구분	발전사업자의 입찰전략 결정
완비 시장	$\begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (m_2 + m_0)(\Delta + m_2 m_0) & -m_2 m_0^2 \\ -m_1 m_0^2 & (m_1 + m_0)(\Delta + m_1 m_0) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta(m_2 + m_0)b_1 + m_2^2 m_0 \phi_0 \\ \Delta(m_1 + m_0)b_2 + m_1^2 m_0 \phi_0 \end{pmatrix}$
불완비 시장	$k_1^{(n)} = \frac{m_0 m_{21}^{(n-1)}}{m_0 + m_{21}^{(n-1)}} q_1^{(n-1)} + b_1, \quad k_2^{(n)} = \frac{m_0 m_{12}^{(n-1)}}{m_0 + m_{12}^{(n-1)}} q_2^{(n-1)} + b_2$

표 2에서 $q_1^{(n)}, k_2^{(n)}$ 은 n번째 입찰을 통해 결정된 G_2 의 전력거래량 그리고 G_2 의 n번째 입찰전략을 의미한다. 또한 $m_{ij}^{(n)}$ 은 G_j 가 n번째 입찰을 통해 m_i 를 추정한 값을 의미한다.

불완비시장은 완비시장과 달리 추정을 통해 입찰전략을 결정한다. 그러므로 완비시장에서는 입찰의 순서를 표시하지 않았지만 불완비시장에서는 입찰의 순서를 표시한다.

표 2에 나타난 불완비시장의 입찰전략은 경쟁사업자의 입찰전략에 관계없이 한계비용함수를 추정한 값과 과거의 전력거래량만을 알고 있으면 사용가능하다. 그러므로 한계비용 불완비시장과 입찰전략 불완비시장에서 동일한 입찰전략 수립식이 사용된다.

5. 불완비시장에서 한계비용함수의 추정

5.1 정보의 불완비성

불완비시장에서 입찰전략을 결정하기 위해서는 표 3과 같이 발전사업자가 전력시장에서 알 수 있는 정보와 알 수 없

는 정보를 정확히 구분해야 한다. 또한 한계비용함수를 추정하기 위해, 한계비용함수가 영향을 미치는 것이 무엇이고 어떻게 영향을 미치는지를 분석할 필요가 있다.

표 3은 G_1, G_2 가 공급경쟁을 하는 상황에서 G_1 이 알고 있는 정보와 모르고 있는 정보를 구분한 것이다.

표 3 정보의 불완비성과 G_1 의 정보
Table 3 Available information to G_1

구분	G_1 이 알고 있는 전력시장 정보	G_1 이 모르고 있는 전력시장 정보
입찰 전략 불완비 시장	전력가격과 G_2 의 입찰함수 관계	G_2 의 한계비용함수
	$p^{(n)} = k_2^{(n)} + m_2 q_2^{(n)}$	
	G_2 의 입찰전략 수립과정	m_2, b_2
	$k_2^{(n)} = m_0 m_1 q_2^{(n-1)} / (m_0 + m_1) + b_2$	G_2 의 입찰전략
한계 비용 불완비 시장	수요 특성, 전력거래	$k_2^{(n)}$
	$m_0, b_0, p^{(n)}, q_1^{(n)}, q_2^{(n)}$	
	입찰전략 불완비시장에서 알고 있는 G_1 의 정보	G_2 의 한계비용함수
G_2 의 입찰전략		
	$k_2^{(n)}$	m_2, b_2

여기서, $p^{(n)}$ 은 n번째 입찰을 통해 결정되는 전력가격을 의미한다.

정보의 불완비성에 상관없이 전력가격은 사회적 후생을 극대화시키는 과정을 통해 결정된다. 그러므로 G_1 은 표 3과 같이 G_2 의 입찰함수와 시장가격의 관계를 유도할 수 있다[9].

$k_2^{(n)}$ 은 G_2 의 한계비용함수를 토대로 결정되고 $k_2^{(n)}$ 은 가격에 영향을 미친다. 그러므로 G_1 은 G_2 의 한계비용함수와 가격의 관계 그리고 한계비용함수와 $k_2^{(n)}$ 의 관계를 이용하여 G_2 의 한계비용함수를 추정하게 된다. 여기서 주의할 점은 한계비용 불완비시장에서 G_1 은 $k_2^{(n)}$ 의 값과 수립식을 알 수 있지만 입찰전략 불완비시장에서는 $k_2^{(n)}$ 의 수립식만을 알 수 있다는 것이다.

표 3에 나타난 $k_2^{(n)}$ 은 G_1 이 생각하는 G_2 의 입찰전략 수립식이고 표 2의 $k_2^{(n)}$ 은 G_2 가 실제 입찰전략을 수립하는 식이다. G_2 의 실제 입찰전략은 G_1 의 한계비용함수 기울기 m_1 을 추정한 $m_{12}^{(n-1)}$ 으로 구성되어 있다. 그러므로 G_1 이 $k_2^{(n)}$ 의 수립과정을 정확히 알기 위해서는 $m_{12}^{(n-1)}$ 을 다시 추정해야 한다. 하지만 시장에서 $m_{12}^{(n-1)}$ 을 다시 추정할 수 있는 정보는 없다. 그러므로 표 3에 나타난 $k_2^{(n)}$ 과 같이, G_1 은 자신의 한계비용함수 기울기 m_1 을 사용하여 $k_2^{(n)}$ 을 계산하는 것으로 가정한다.

5.2 한계비용 불완비시장

한계비용함수를 추정한다는 것은 기울기와 절편을 추정한다는 것과 같은 의미이다. 그리고 한계비용함수가 전력가격과 입찰전략에 미치는 영향은 표 3의 전력가격과 G_2 의 입찰함수 관계, 그리고 G_2 의 입찰전략 수립과정에 나타나 있다.

전력가격과 G_2 의 입찰함수 관계를 고려해볼 때, 변수의 값

은 $m_2, k_2^{(n)}, p^{(n)}, q_2^{(n)}$ 으로 이루어져있다. 그리고 변수 $k_2^{(n)}, p^{(n)}, q_2^{(n)}$ 는 시장에서 공개된다. 그러므로 전력가격과 G_2 의 입찰함수 관계를 이용한다면 m_2 를 추정할 수 있다. 반면, b_2 는 G_2 의 입찰전략 수립과정을 통해 추정할 수 있다. G_2 의 입찰전략은 $b_2, k_2^{(n)}, p^{(n)}, q_2^{(n-1)}, m_0, m_1$ 을 통해 결정된다. 여기서 $k_2^{(n)}, p^{(n)}, q_2^{(n-1)}, m_0$ 는 시장에서 공개되고 m_1 은 G_1 의 한계비용함수 기울기이므로 G_1 은 G_2 의 입찰전략 수립과정을 통해 b_2 를 추정할 수 있다.

표 3에 나타난 전력가격과 G_2 의 입찰함수 관계를 m_2 에 대해 정리하면 식 (9)와 같이 m_2 를 추정하는 식이 유도된다.

$$m_{21}^{(n)} = (p^{(n)} - k_2^{(n)}) / q_2^{(n)} \quad (9)$$

추정의 정확성은 사용된 식이 정확한가를 통해 판단할 수 있다. 표 3에 나타난 전력가격과 입찰함수의 관계는 경쟁체제에서 균형점이 결정되는 원리이다[9,10]. 따라서 G_1 이 생각하는 전력가격과 G_2 의 입찰함수 관계, 그리고 실제 G_2 의 입찰함수와 전력가격의 관계는 동일하다. 또한 G_1 은 전력시장에서 식 (9)의 우변에 나타난 변수 값을 알 수 있으므로 $m_{21}^{(n)}$ 은 실제 m_2 와 일치한다.

반면, b_2 는 G_2 의 입찰전략 수립과정을 통해 추정을 할 수 있다. 표 3에 나타난 G_2 의 $k_2^{(n)}$ 결정과정을 b_2 에 대해 정리하면 식 (10)이 유도된다.

$$b_{21}^{(n)} = \frac{m_0 m_1}{m_0 + m_1} q_2^{(n-1)} + k_2^{(n)} \quad (10)$$

여기서 $b_{21}^{(n)}$ 은 G_1 이 n 번째 입찰에서 b_2 를 추정한 값이다.

$b_{21}^{(n)}$ 의 정확성은 G_1 이 $k_2^{(n)}$ 의 수립식을 얼마만큼 정확히 아는냐에 따라 좌우된다. 앞 절에서 G_1 이 생각하는 $k_2^{(n)}$ 은 m_1 을 사용하여 계산되고 실제 $k_2^{(n)}$ 은 $m_{12}^{(n-1)}$ 을 사용하여 계산되는 것을 설명했다. 하지만 한계비용 불완비시장에서는 식 (9)와 같이 한계비용함수 기울기를 정확히 추정할 수 있기 때문에 m_1 과 $m_{12}^{(n-1)}$ 은 같은 값을 가진다. 그러므로 G_1 이 생각하는 $k_2^{(n)}$ 의 수립과정과 실제 $k_2^{(n)}$ 의 수립과정이 일치한다. 결국 한계비용함수 기울기를 추정한 후에 추정하는 b_2 도 m_2 와 마찬가지로 정확히 추정된다.

5.3 입찰전략 불완비시장

한계비용 불완비시장에서는 경쟁사업자의 입찰전략을 알 수 있기 때문에 한계비용함수 기울기와 절편을 독립적인 식으로 추정할 수 있다. 하지만 입찰전략 불완비시장에서는 한계비용함수 뿐만 아니라 입찰전략도 알 수 없기 때문에 한계비용 불완비시장에서의 추정기법을 그대로 적용할 수 없다.

추정의 목적은 경쟁사업자의 한계비용함수를 아는 것이다. 표 3의 입찰전략 불완비시장에서 알 수 있듯이 b_2 는 $k_2^{(n)}$ 에 영향을 미치고 $k_2^{(n)}$ 은 $p^{(n)}$ 에 영향을 준다. 그러므로 $k_2^{(n)}$ 과 $p^{(n)}$ 의 관계를 이용하면 b_2 와 $p^{(n)}$ 의 관계를 유도할 수 있다.

또한 m_2 도 입찰함수에 포함되어 $p^{(n)}$ 에 영향을 준다. 결국, b_2 와 m_2 가 모두 $p^{(n)}$ 에 영향을 미치므로 $p^{(n)}$ 정보를 이용하여 b_2, m_2 를 추정할 수 있다.

전력가격은 표 3과 같이 $p^{(n)} = k_2^{(n)} + m_2 q_2^{(n)}$ 으로 결정된다. 그리고 G_1 은 $k_2^{(n)}$ 이 $m_0 m_1 q_2^{(n-1)} / (m_0 + m_1) + b_2$ 를 통해 수립된다고 판단한다. 그러므로 $k_2^{(n)}$ 수립식을 $p^{(n)}$ 결정식에 대입하면 식 (11)과 같은 b_2, m_2 와 $p^{(n)}$ 의 관계를 유도할 수 있다.

$$p^{(n)} = m_0 m_1 q_2^{(n-1)} / (m_0 + m_1) + b_2 + m_2 q_2^{(n)} \quad (11)$$

G_1 이 추정하고자 하는 정보는 b_2 와 m_2 이지만 전력시장에서 얻을 수 있는 정보는 식 (11) 뿐이다. 이때 사용할 수 있는 방법은 b_2 와 m_2 를 교대로 추정하는 방법이다. 예를 들어, 처음에 m_2 를 가정한 상태에서 b_2 를 추정하고 다시 b_2 와 시장 거래실적을 이용하여 m_2 를 추정하는 방법이다. 추정방법을 식으로 나타내면 식 (12)와 식(13)과 같다.

$$b_{21}^{(n)} = p^{(n)} - m_{21}^{(n-1)} q_2^{(n)} - q_2^{(n-1)} \cdot \{m_0 m_1 / (m_0 + m_1)\} \quad (12)$$

$$m_{21}^{(n)} = [p^{(n)} - q_2^{(n-1)} \cdot \{m_0 m_1 / (m_0 + m_1)\} - b_{21}^{(n-1)}] / q_2^{(n)} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)의 추정방법은 G_1 이 생각하는 $k_2^{(n)}$ 수립식을 $p^{(n)}$ 의 결정과정에 대입하여 유도하였다. 그러므로 추정은 G_1 이 생각하는 $k_2^{(n)}$ 과 실제 $k_2^{(n)}$ 의 수립식이 같을 때 정확하게 이루어진다. 두 입찰전략을 구분하여 표현하기 위해 G_1 이 생각하는 $k_2^{(n)}$ 은 $k_{21}^{(n)}$ 을 사용하여 표현한다. 앞 절 언급했듯이, $k_{21}^{(n)}$ 과 $k_2^{(n)}$ 의 차이는 m_1 을 사용하여 계산되느냐와 추정한 $m_{12}^{(n-1)}$ 을 사용하여 계산하느냐에 따라 다르게 나타난다.

입찰전략 불완비시장에서 G_1 이 추정의 정확성을 판단할 수 있는 정보는 입찰함수와 가격의 관계뿐이다. 그러므로 G_1 이 추정한 관계와 실제 관계가 동일하다면 G_1 은 정확하게 추정했다고 판단한다. 즉, $k_{21}^{(n)} + m_{21}^{(n-1)} q_2^{(n)} = k_2^{(n)} + m_2 q_2^{(n)} = p^{(n)}$ 의 관계가 성립한다면 G_1 은 m_2 를 부정확하게 추정했어도 $m_{21}^{(n)}$ 를 다시 계산하지 않는다. 결국, 추정의 정확성을 확인할 수는 없다.

6. 사례 연구

6.1. 한계비용 불완비시장

대상계통으로 발전력 제약이 없는 G_1, G_2 가 공급경쟁에 참여하고 수요는 하나의 집중된 수요특성을 가정한다. G_1 은 $m_1 = 0.45, b_1 = 5$ 의 한계비용함수를 갖고 G_2 는 $m_2 = 0.25, b_2 = 10$ 의 한계비용함수를 갖는다. 수요특성은 $m_0 = 0.5, b_0 = 100$ 의 탄력성을 갖는 일차함수로 가정한다. 또한 선로계약 등의 계통제약은 고려하지 않는다.

본 연구에서 제안한 추정기법을 한계비용 불완비시장에 적용한 결과는 표 4와 같다. 표 4에서 한계비용 불완비시장의 X는 추정이 이루어지지 않은 상태를 의미하고 완비시장의 X는 추정이 필요하지 않다는 것을 의미한다. n 는 입찰의

순서를 의미한다.

표 4 한계비용 불완비시장의 적용 결과

Table 4 Estimation of parameters without marginal cost information

구분	n	G ₁			G ₂			시장운영자		
		k ₁ ⁽ⁿ⁾	b ₁ ⁽ⁿ⁾	m ₂₁ ⁽ⁿ⁾	k ₂ ⁽ⁿ⁾	b ₂ ⁽ⁿ⁾	m ₁₂ ⁽ⁿ⁾	g ₁ ⁽ⁿ⁾	g ₂ ⁽ⁿ⁾	p ⁽ⁿ⁾
한계비용	1	5	X	0.25	10	X	0.45	56.76	82.16	30.54
불완비	2	14.46	10	0.25	29.46	5	0.45	62.45	52.42	42.56
시장	3	14.54	10	0.25	24.73	5	0.45	57.22	62.21	40.29
완비시장	1	14.54	X	X	24.73	X	X	57.22	62.21	40.29

한계비용 불완비시장에서 한계비용함수 기울기와 절편을 추정하는 방법은 식 (9)와 식 (10)에 나타나 있다. 5.2절에서 언급했듯이, 한계비용함수 절편의 추정은 기울기를 추정한 후에 이루어지는 것이 바람직하므로 사례계통에서 한계비용함수 기울기를 먼저 추정한 후에 절편을 추정한다.

첫 번째 입찰전략은 한계비용함수 절편과 같은 k₁⁽¹⁾ = 5, k₂⁽¹⁾ = 10으로 설정한다.

첫 입찰이 완료된 후, 발전사업자는 전력가격과 거래량 그리고 경쟁사업자의 입찰전략을 알 수 있다. 그러므로 식(9)와 같이 한계비용함수 기울기를 정확히 추정할 수 있다. 하지만 한계비용함수 절편은 식 (10)과 같이 이전단계의 전력거래량이 필요하므로 한 번의 입찰을 통해 나타나는 시장실적만으로 추정할 수 없다.

두 번째 입찰전략은 첫 번째 입찰결과와 경쟁사업자의 한계비용함수 기울기를 추정한 값이 반영되어 수립된다. 입찰전략이 수립되는 식은 표 2에 나타나 있다.

두 번의 입찰이 완료된 후, 경쟁사업자의 입찰전략이 수립되는 과정을 이용하여 한계비용함수 절편을 추정할 수 있다. 추정에 관련된 식은 식 (10)에 나타나 있고 추정값은 b₂₁⁽²⁾ = 10, b₁₂⁽²⁾ = 5로 b₂ = 10, b₁ = 5와 같은 값을 가진다.

5.2절을 통해 한계비용함수가 정확히 추정되는 원리를 설명하였다. 또한 사례계통 결과를 통해 정확한 추정을 위해서는 두 번의 입찰이 필요함을 보였다. 따라서 세 번째 입찰전략은 완비시장과 같은 방법을 사용하여 계산된다.

시장의 효율성은 시장실적을 통해 판단할 수 있다. 비록 한계비용함수를 추정하기 위해서 두 번의 입찰과정이 필요했지만 수립된 상태에서 나타나는 시장실적은 완비시장과 동일하였다. 그러므로 한계비용 불완비시장에서 나타나는 정보의 불완전성은 시장의 효율성에 큰 영향을 미치지 않는다.

6.2 입찰전략 불완비시장

입찰전략 불완비시장에서의 추정에 관련된 식(12)와 식 (13)을 고려해 볼 때, 추정은 두 번의 입찰이 진행된 후에 가능하다. 또한 두 번째 입찰전략은 표 2와 같이 첫 입찰을 통해 나타나는 시장실적과 경쟁사업자의 한계비용함수 기울기를 추정한 값을 사용하여 계산되므로 추정을 위해서는 첫 입찰전략과 초기에 경쟁사업자의 한계비용함수 기울기를 가정한 값이 필요하다.

그림 1은 첫 입찰전략을 자신의 한계비용함수 절편으로 선택하고 초기에 경쟁사업자의 한계비용함수 기울기를 자신

의 한계비용함수 기울기로 고려하였을 때 나타나는 추정과정과 입찰전략 변화를 나타낸다. 즉, G₁은 k₁⁽¹⁾ = 5, m₂₁⁽¹⁾ = 0.45로 경쟁에 참여하고 G₂는 k₂⁽¹⁾ = 10, m₁₂⁽¹⁾ = 0.25로 가정했을 때 결과이다.

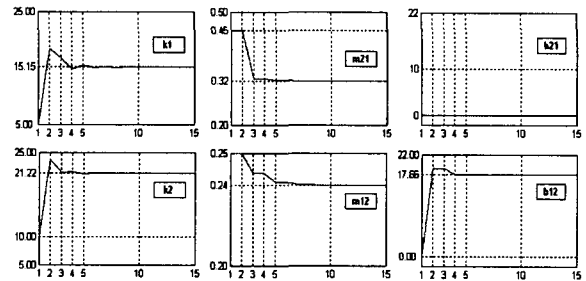


그림 1 한계비용함수 추정과 입찰전략의 변화
Fig. 1 Estimation of parameters without bidding information

그림 1에서 m₁₂⁽ⁿ⁾과 b₁₂⁽ⁿ⁾이 계단 모양을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 b₁₂⁽ⁿ⁾과 m₁₂⁽ⁿ⁾이 각각 식 (12)와 식 (13)을 이용하여 교대로 추정되기 때문에 나타나는 것이다.

수렴상태에서 추정 값은 m₂₁ = 0.32, m₁₂ = 0.24, b₂₁ = 0, b₁₂ = 17.66으로 실제 m₂ = 0.25, m₁ = 0.45, b₂ = 10, b₁ = 5와 차이가 있고 입찰전략은 k₁ = 15.15, k₂ = 21.22로 완비시장을 기준으로 각각 4%, 14%정도의 차이가 있다. 입찰전략의 차이로 인해 전력가격과 거래량도 완비시장과 다른 값을 지님을 예상할 수 있다.

경쟁사업자의 입찰전략을 어떻게 생각하고 있는지는 한계비용함수를 추정한 값을 통해 계산할 수 있다. G₁은 b₂₁, m₂₁을 통해 k₂₁이 16.60이라 생각하고 있고 G₂는 b₁₂, m₁₂를 통해 k₁₂가 26.40이라고 판단하고 있다. 그러므로 입찰전략도 부정확하게 추정이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

발전사업자는 경쟁사업자의 입찰함수에 대해 이득을 극대화시키는 입찰전략을 선택한다. 하지만 경쟁사업자의 입찰함수를 알 수 없으므로 실제 입찰함수 대신 추정한 입찰함수를 대상으로 이득을 계산한다. 추정한 경쟁사업자의 입찰함수에 대해 이득을 계산하면 그림 2와 같다.

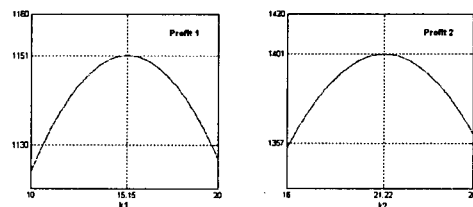


그림 2 입찰전략 불완비시장에서의 내쉬균형 확인
Fig. 2 Marginal profits at equilibrium without bidding information

추정된 G₂의 입찰함수에 대해 G₁의 이득을 계산하면 그림 2의 왼쪽에 표시된 그래프와 같다. 그림에서 알 수 있듯이, G₁은 k₁ = 15.15를 선택할 때 이득이 1151로 극대화된다. 또한

G_2 도 같은 논리에 의해 $k_2 = 21.22$ 를 선택할 때 이득이 1401로 극대화된다. 따라서 각 발전사업자의 이득은 수렴된 k_1, k_2 에서 극대화되므로 수렴된 상태는 내쉬 균형의 조건과 일치한다.

결국 입찰전략과 한계비용이 모두 공개되지 않는다면 부정확하게 추정된 상태에서 균형이 이루어지고 이로 인해 전력거래는 완비시장과 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.

7. 결 론

본 연구는 전력시장에서 나타나는 정보의 불완비성에 초점을 맞추어 진행하였다. 경쟁사업자의 한계비용함수를 알고 있는지에 따라 완비시장과 불완비시장으로 모형화하였다. 그리고 불완비시장을 입찰전략의 공개여부에 따라 한계비용 불완비시장, 입찰전략 불완비시장으로 세분화하여 분석을 시도하였다.

완비시장에서는 2단계 최적화 과정을 이용하여 입찰전략을 선택하는 과정을 보였고 불완비시장에서는 경쟁사업자의 한계비용함수를 추정하고 추정된 정보를 통해 입찰전략을 수립하는 모형을 제안하였다.

한계비용 불완비시장에서는 가격과 경쟁사업자의 입찰전략을 알 수 있으므로 한계비용함수 기술기와 절편을 독립적인 식에 의해 추정할 수 있었다. 하지만 입찰전략 불완비시장에서는 경쟁사업자의 입찰전략을 모르기 때문에 입찰전략 수립식과 가격식을 연립하여 하나의 식을 구성하고 가격과 거래량 정보를 이용하여 한계비용함수 절편과 기술기를 추정하는 기법을 제안하였다.

사계제통에 적용한 결과, 한계비용 불완비시장에서는 두 번의 입찰을 통해 한계비용함수를 정확히 추정함을 알 수 있었다. 반면, 입찰전략 불완비시장에서는 정보의 부족으로 인해 추정이 부정확하게 이루어지고 균형상태의 입찰전략도 완비시장과 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 결국 한계비용함수와 입찰전략이 모두 공개되지 않는다면 전력거래는 완비시장과 다른 상태에서 균형을 이루어질 가능성이 있다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프
라구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] 한국전력거래소, 전력시장운영규칙, <http://www.kpx.or.kr>.
 [2] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game theory*, MIT Press, 1991.
 [3] T. Li, M. Shahidehpour, "Strategic Bidding of Transmission-Constrained GENCOs with Incomplete Information," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 20, no. 1, pp. 437 - 447, Feb. 2005.
 [4] Y. Zhang, J. Fand, F. Hu, S. Chen and Y. Ni, "Analysis of the network constraints' effects on strategic behavior in an incomplete information environment," *International Conference on, Power System Technology*, vol. 1, pp. 428-432, Oct. 2002.

[5] F. Wen and A. David, "Optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators," *IEEE Trans. on Power System*, vol. no. 16, pp. 15-21, Feb. 2001.
 [6] R. Rerrero, J. Rivera and M. Shahidehpour, "Applications of Games with Incomplete Information for Pricing Electricity in Deregulated Power Pools," *IEEE trans. on Power System*, vol. 13, no. 1, pp. 184-189, Feb. 1998.
 [7] Green. R. and D. Newberry, "Competition in the British Electric Spot Market," *Journal of Political Economy*, 100, pp. 929-953, 1992.
 [8] P. D. Klemperer and M. A. Meyer, "Supply Function Equilibria in Oligopoly Under Uncertainty," *Econometrica*, vol. 57, no. 6, pp. 1243-1277, Nov. 1989.
 [9] 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, 1990.
 [10] Cheol-Hee Cho and Kwang-Ho Lee, "A Study in the selection of a Bidding Parameter at the Bidding Function Model in an Electricity Market," *KIEE Trans*, vol. 53A, no. 11, pp. 630-635, Nov. 2004.

저 자 소 개



신재홍 (申載弘)

1979년 1월 2일생. 2004년 단국대 공대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
 Tel : 02-799-1092
 E-mail : sjh138@dku.edu



이광호 (李光浩)

1965년 12월 22일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 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