

# 부하패턴을 이용한 전력시장 정보의 불완비성 추정에 관한 연구

論 文

56-5-5

## The Estimation of Incomplete Information in Electricity Markets by Using Load Pattern Changes

申載弘<sup>†</sup> · 李光浩<sup>\*</sup>

(Jae-Hong Shin · Kwang-Ho Lee)

**Abstract** - This paper presents a methodology of estimating incomplete information in electricity markets for analyzing the gaming behavior of Generating Companies (GENCOs). Each GENCO needs to model its opponents' unknown information of strategic biddings and cost functions. In electricity markets with complete information, each GENCO knows its rivals' payoff functions and tries to maximize its own profit at Nash equilibrium(NE) by acknowledging the rivals' cost function. On the other hand, in the incomplete information markets, each GENCO lacks information about its rivals. Load patterns can change continuously due to many factors such as weather, price, contingency, etc. In this paper, we propose the method of the estimation of the opponents' cost function using market price, transaction quantities, and customer load patterns. A numerical example with two GENCOs is illustrated to show the basic idea and effectiveness of the proposed methodology.

**Key Words** : Load Pattern, Incomplete Information, Cost Function, Nash Equilibrium, Social Welfare

### 1. 서 론

현재 우리나라의 발전시장은 경쟁체제로 이행하기 위한 선행단계로 변동비반영시장(Cost Based Pool ; CBP)을 운영하고 있다. 변동비반영시장의 핵심은 원가주의에 근거하여 전력가격을 결정하는 것으로 발전기업의 가격입찰을 방지하고 있는 구조이다[1]. 하지만 시장경쟁요소를 높이기 위한 가격입찰시장(Price-Bidding Generation Pool ; PBP)이 구축되면 가격입찰요소가 반영되어 발전기업간의 게임현상은 보다 다양한 형태로 나타날 것이다.

향후 나타날 가격입찰시장은 발전기업의 전략적 입찰함수에 의해 전력거래가 결정되므로 경쟁기업의 실제 비용특성을 정확히 알기란 매우 힘들다. 이로 인해 발전기업의 경쟁은 경쟁기업의 비용특성을 모르는 불완비시장(Incomplete Information Market; IIM)에서 이루어진다[2-5].

과점형태의 전력시장에서 발전기업의 이득에 직접적인 영향을 미치는 주요 요인은 경쟁기업의 입찰함수인데, 입찰함수는 비용특성을 바탕으로 수립된다[6,7]. 그러므로 불완비시장에서 발전기업의 이득을 극대화시키는 입찰함수를 결정하기 위해서는 경쟁기업의 비용특성을 추정해야 한다[2].

불완비시장에서 나타나는 경쟁의 결과를 해석하기 위해 다양한 연구가 발표되었으나, 이들 연구는 대부분 베이즈균형에 근거하고 있다[4,5]. 베이즈균형은 경쟁기업의 비용특성에 대한 믿음정도를 의미하는 확률이 필수적인데 이들 연구

에서는 임의의 확률 값을 사용하여 분석하였기 때문에 경쟁을 분석하는데 한계를 지니고 있다. 또한, 비용특성의 추정에 대한 고려가 부족하기 때문에 발전기업의 전략적 행태를 분석하는데 취약하다. 이러한 발전기업의 전략적 행태를 분석하기 위해 시장실적을 이용하여 비용특성 추정을 시도한 연구도 소개된바 있으나 정보의 부족으로 인해 추정의 정확성을 보장할 수 없었다[2].

우리나라의 입찰시장은 각 시간대별 예측된 부하특성을 기반으로 운영되는데 부하예측 프로그램의 기본구조는 전력시장의 환경이 비슷한 과거의 패턴을 이용하여 미래의 부하를 예측하는 것이다[1]. 하지만 부하특성은 예상치 못한 기후변화 또는 전기설비 등의 고장에 의해 급격히 변동하기 때문에 부하를 정확히 예측한다는 것은 매우 어려운 문제이다[8]. 그러므로 발전기업이 예측된 부하를 바탕으로 예상한 전력거래량과 실제 전력거래량은 차이가 나타날 수 있다.

본 연구는 이와 같이 부하예측의 오차와 전략적 입찰 조건식의 상관관계를 이용하여 경쟁기업의 비용특성을 추정하는 방법을 제안한다.

### 2. 전력시장의 모형화

#### 2.1 완비시장과 불완비시장의 구분

입찰모형에 따라 완비시장(Complete Information Market; CIM)과 불완비시장을 구분하는 기준이 약간 다르나 경쟁기업의 비용특성을 모르고 경쟁하는 시장을 불완비시장으로 정의하고 비용특성을 알고 경쟁하는 전력시장을 완비시장으로 정의하는 것은 공통적이다[4,5]. 본 연구는 비용특성을 나타내는 한계비용함수와 더불어 입찰함수의 불완비성을 고려하여 표 1과 같이 완비시장과 불완비시장을 구분한다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 檀國大 電氣工學科 博士課程

E-mail : sjh138@dku.edu

<sup>\*</sup> 正會員 : 檀國大 電氣工學科 副教授

接受日字 : 2007年 1月 23日

最終完了 : 2007年 4月 10日

표 1 완비시장과 불완비시장의 정보공개 비교

Table 1 Comparison of public information in CIM and IIM

구분	완비시장	불완비시장
한계비용함수, 입찰전략	공개	비공개
시장실적, 수요함수	공개	공개

과점시장에서 발전기업의 이득은 경쟁기업으로부터 영항을 받으므로 발전기업이 이득을 극대화시키는 입찰전략을 결정하기 위해서는 경쟁기업의 입찰전략에 대한 분석이 필요하다.

경쟁기업의 비용특성을 알고 경쟁하는 완비시장에서는 경쟁기업의 이득함수를 알 수 있기 때문에 불완비시장에 대한 연구에 비해 폭넓은 방면에서 연구가 진행되고 있으며 경쟁의 균형에 대해서도 잘 알려져 있다[7]. 하지만 불완비시장에서는 경쟁기업의 이득함수를 알 수 없기 때문에 균형상태에 대한 연구는 완비시장에 비해 매우 부족한 실정이며 베이스균형을 도출하는데 치중되어 있다[4,5].

2.2 부하의 모형화

우리나라의 일·주간 부하예측은 2001년 기초전력공학 공동연구소에서 개발한 단기수요예측 프로그램(LOFY2000)을 사용하고 있다[1]. 예측 프로그램의 기본구조는 과거의 수요특성을 이용하여 예측하는 것으로 전력시장 환경이 거래일과 유사했던 과거 거래일의 데이터를 활용하는 것이다. 거래일의 각 시간대별 수요예측 과정을 나타내면 표 2와 같다.

표 2 거래일의 수요함수 예측

Table 2 Trading days of demand forecasts

거래시간	거래일		수요예측
	t-2일	t-1일	t일
00시	$D_{00}^{(t-2)}$	$D_{00}^{(t-1)}$	$D_{00}^{(t-2)}, D_{00}^{(t-1)}$ 를 활용
⋮	⋮	⋮	⋮
12시	$D_{12}^{(t-2)}$	$D_{12}^{(t-1)}$	$D_{12}^{(t-2)}, D_{12}^{(t-1)}$ 를 활용

표에서  $D_h^{(t)}$ 는 t일 h시간의 수요함수를 의미하는 것으로 예측하고자 하는 t일 h시간의 수요함수는 전력시장 환경이 유사했던 t-1일 h시, t-2일 h시의 수요함수를 이용하여 예측하는 것이다.

불완비시장에서 발전기업은 기준시점과 수요함수가 유사했던 과거의 거래량과 가격 정보를 이용하여 입찰전략을 계산한다. 그러므로 비용특성에 추정되는 정보도 기준시점과 유사한 수요함수에서 거래된 과거의 데이터를 활용할 필요가 있다. 즉, t일 12시에 이루어지는 추정은 t-1일 12시의 시장실적을 활용하는 것이다.

시간적으로 부하 변화의 패턴이 일정하다면 t일 h시간의 수요함수와 t-1일 h시간의 수요함수는 매우 유사하다. 그러므로 본 연구에서는  $D_h^{(t-1)} = D_h^{(t)}$ 으로 가정하고 경쟁기업의 비용특성을 추정하는 식을 유도한다. 하지만 이와 같은 추정 방법은 수요함수가 일정하다는 가정으로 인해, 정확성을 보장하기 어렵다[2]. 이에 대한 자세한 설명을 4.1절에서 소개

한다. 본 연구에서는 부정확한 추정을 개선시키기 위해, 부하패턴이 변동되는 상황까지 고려하여 추정의 정확성을 높이는 방법을 제안한다.

3. 완비시장의 균형점

정식화 모형은 발전기업  $G_1, G_2$ 가 상대방의 비용특성을 알고 경쟁하는 시장을 대상으로 한다. 그리고 전력의 수요함수는 1차의 가격탄력성을 갖는 함수로 정의한다. 발전기업의 입찰함수와 한계비용함수는 공급함수모형을 사용하며 1차함수로 가정한다[9]. 그리고 입찰전략은 한계비용함수의 절편을 전략적으로 선택한다고 가정한다. 발전기업  $G_i$ 의 한계비용함수와 입찰함수 그리고 수요함수를 식으로 나타내면 아래와 같다. 단, 발전기업은 예측된 수요함수에 해당하는 입찰전략을 즉각적으로 선택할 수 있기 때문에 거래시점을 구분하지 않고 균형전략을 유도한다.

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

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

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

$q_i$  : 전력거래량,  $m_i$  : 한계비용함수의 기울기

$b_i$  : 한계비용함수의 절편,  $k_i$  : 입찰전략

$b_0$  : 부하특성의 절편,  $m_0$  : 부하특성의 기울기

균형상태의 전력가격과 거래량은 MO(Market Operator)의 시장거래가치 극대화목적과 발전기업의 이득 극대화 목적을 동시에 만족시켜야 한다. 이런 문제를 해결하는 방법을 2단계(Bi-level) 최적화라고 하며 MO의 목적함수와 발전기업의 목적함수를 동시에 극대화시키는 과정을 통해 균형상태를 도출할 수 있다. MO와 발전기업의 목적함수를 식으로 나타내면 아래와 같다.

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

$$\max_{k_i} \Pi_i(k_i, q_i) = p q_i - C_i(q_i, k_i) \tag{5}$$

MO는 식 (4)와 같이 전력의 시장거래가치를 의미하는 사회적후생(Social Welfare; SW)을 극대화시키는 전력거래를 결정한다. 식 (4)에서 B는 소비자 만족정도(Benefit)을 의미하며 부하특성 D를 전체 전력거래량을 적분하여 계산된다. 또한  $\overline{C}_i$ 는 MO가 고려하는 발전비용을 의미하는 것으로 입찰함수  $\overline{C}_i'$ 을 전력거래량으로 적분함으로써 구해진다.

반면, 발전기업은 식 (5)와 같이 이득  $\Pi_i$ 를 극대화시키는 입찰전략  $k_i$ 를 선택한다. 이득은 전력가격 p와 거래량  $q_i$ 로 계산되는 수익(Revenue)에서 비용  $C_i$ 를 뺀 값으로 계산되며  $C_i$ 는 한계비용함수  $C'_i$ 을 전력거래량으로 적분하여 계산할 수 있다.

MO의 목적을 만족시키는 균형상태의 전력거래량은 SW를 전력거래량  $q_i$ 로 편미분하는 과정을 통해 계산되며 수요함수와  $G_i$ 의 입찰함수는 식 (6)과 같은 관계가 나타나고 수

요함수와  $G_2$ 의 입찰함수는 식 (7)과 같은 관계가 나타난다.

$$b_0 - m_0(q_1 + q_2) = k_1 + m_1q_1 = p \quad (6)$$

$$b_0 - m_0(q_1 + q_2) = k_2 + m_2q_2 = p \quad (7)$$

발전기업의 이득을 극대화시키는 입찰전략은 이득  $\Pi_i$ 를  $k_i$ 로 편미분하여 계산할 수 있으며, 식 (8), 식 (9)와 같은 극대화조건으로 유도된다[2].

$$k_1 = \{m_0m_2/(m_0 + m_2)\}q_1 + b_1 \quad (8)$$

$$k_2 = \{m_0m_1/(m_0 + m_1)\}q_2 + b_2 \quad (9)$$

MO와 발전기업의 목적을 동시에 극대화시키는 균형상태의 입찰전략은 식 (6)~(9)를 연립하여 계산할 수 있으며 계산된 식에 거래일 정보를 포함하여 나타내면 식 (10)과 같다.

$$\begin{pmatrix} k_1^{(t)} \\ k_2^{(t)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (m_2 + m_0^{(t)})(\Delta + m_2m_0^{(t)}) & -m_2(m_0^{(t)})^2 \\ -m_1(m_0^{(t)})^2 & (m_1 + m_0^{(t)})(\Delta + m_1m_0^{(t)}) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta(m_2 + m_0^{(t)})b_1 + m_2^2m_0^{(t)}b_0^{(t)} \\ \Delta(m_1 + m_0^{(t)})b_2 + m_1^2m_0^{(t)}b_0^{(t)} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\Delta = m_1m_0^{(t)} + m_2m_0^{(t)} + m_1m_2$$

$k_i^{(t)}$  :  $G_i$ 의 t일 입찰전략,

$m_0^{(t)}, b_0^{(t)}$  : MO가 예측한 t일의 수요함수 기울기와 절편

경쟁기업의 한계비용함수를 알 수 있는 완비시장에서 발전기업은 식 (10)에 나타난 모든 변수의 값을 알 수 있으므로 식 (10)과 같은 균형상태의 입찰전략을 선택하여 경쟁에 참여한다.

#### 4. 불완비시장의 분석방법

##### 4.1 일정한 부하패턴에서 불완비정보의 추정

불완비시장은 경쟁기업의 한계비용함수와 입찰전략을 알 수 없기 때문에 식 (10)과 같은 균형전략을 계산하기가 어렵다. 그러므로 경쟁기업의 한계비용함수를 추정할 필요가 있는데, 본 연구에서는 시장실적을 이용하여 추정하는 방법을 제안한다. 편의상, 발전기업  $G_1$ 이 경쟁기업  $G_2$ 의 한계비용함수  $m_2, b_2$ 를 추정하는 방법을 설명한다.

추정과정을 간단히 설명하면, 시장실적과 입찰함수의 관계, 그리고 입찰함수와 한계비용함수의 관계를 이용하여 시장실적과 한계비용함수의 관계를 유도한 후, 시장실적 정보를 활용하여 한계비용함수를 추정하는 것이다. 이와 같은 추정방법을 사용하기 위해서는 경쟁기업의 입찰함수에 대한 분석이 먼저 이루어져야한다.

경쟁기업  $G_2$ 의 이득을 극대화시키는 입찰전략  $k_2$ 는 식 (9)에 소개되어 있다. 하지만 식에 포함된  $q_2$ 는  $k_2$ 가 제출된 후에 결정되는 거래량으로 입찰전략을 계산하는 시점에서 알 수 없는 값이다. 또한, 식에 포함된  $m_1$ 은 경쟁기업  $G_2$ 가

추정하는  $G_1$ 의  $m_1$ 을 의미하는 것으로 실제  $m_1$ 과 다른 의미를 지닌다. 그러므로  $G_1$ 이  $k_2$ 를 정확히 분석하기 위해서는 경쟁기업  $G_2$ 가 추정한  $m_1$ 에 대한 정보가 필요한데 이를 알기란 매우 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 가정 1과 가정 2를 설정한다.

아래는 가정에 따라  $G_1$ 이 고려하는  $k_2$ 가 어떻게 변화하는지를 나타내는 것으로 굵게 표시된 부분이 가정에 따라 변화된 부분이다.

**가정 1.** 경쟁기업  $G_2$ 의 t일 입찰전략  $k_2^{(t)}$ 를 추정할 때 전일 동일시점의 전력거래량  $q_2^{(t-1)}$ 을 사용한다.

$$k_{21}^{(t)} = \{m_0^{(t)}m_{12}^{(t)}/(m_0^{(t)} + m_{12}^{(t)})\}q_2^{(t-1)} + b_2 \quad (11)$$

**가정 2.** 발전기업  $G_1$ 은 경쟁기업  $G_2$ 의 입찰전략  $k_2$ 가 정확한  $m_1$ 을 사용하여 계산된다고 가정한다.

$$k_{21}^{(t)} = \{m_0^{(t)}m_1/(m_0^{(t)} + m_1)\}q_2^{(t-1)} + b_2 \quad (12)$$

위에서,  $k_{21}^{(t)}$ 는  $G_1$ 이 고려하는 경쟁기업  $G_2$ 의 t일 입찰전략  $k_2$ 를 의미하며,  $m_{12}^{(t)}$ 는 경쟁기업  $G_2$ 가 t일에 추정한  $G_1$ 의 한계비용함수 기울기  $m_1$ 을 의미한다. 그리고  $q_2^{(t-1)}$ 는 t-1일에 거래된 거래량  $q_2$ 를 의미한다.

가정 1은 식 (9)의  $q_2$ 에 대한 해결방안으로 과거의 전력거래량을 사용하여 입찰전략을 계산한다는 것을 의미하며 식 (9)는 식 (11)과 같이 변화된다. 가정 2는 식 (9)의  $m_1$ 에 대한 것으로 경쟁기업  $G_2$ 가 추정한  $m_1$  즉,  $m_{12}^{(t)}$ 를 알 수 없기 때문에 경쟁기업  $G_2$ 는 정확한  $m_1$ 을 사용하여  $k_2$ 를 결정한다고 가정한 것이다.

가정 1과 가정 2에 의해 변화된 식 (12)과 전력거래가 결정되는 식 (7)을 연립하여 추정하고자 하는  $m_2, b_2$ 에 관해 정리하면 다음 식 (13)과 같다.

$$m_2q_2^{(t)} + b_2 = p^{(t)} - \{m_0^{(t)}m_1/(m_0^{(t)} + m_1)\}q_2^{(t-1)} \quad (13)$$

발전기업  $G_1$ 은 식 (13)을 활용하여  $m_2$ 와  $b_2$ 를 추정해야 하지만 식은 한 개이므로 식의 개수가 부족하다. 이로 인해 식 (13)을 만족하는  $m_2$ 와  $b_2$ 는 무수히 존재하는데 이 중에서 전략을 수정하지 않는 안정된 상태를 구하는 방법으로  $m_2$ 와  $b_2$ 를 교대로 추정할 수가 있다.

구체적으로, 과거에 추정된  $m_2$ 와 시장실적을 바탕으로  $b_2$ 를 추정하고 다시 추정된  $b_2$ 와 입찰에 의해 변화된 시장실적을 활용하여  $m_2$ 를 추정하는 방법이다. 이와 같은 과정을 식으로 표현하면 식 (14), 식 (15)와 같다.  $G_1$ 이  $m_2, b_2$ 를 추정한다는 의미를 부여하기 위해,  $G_1$ 이 t번째 입찰에서  $m_2$ 를 추정한 값은  $m_{21}^{(t)}$ 로,  $b_2$ 를 추정한 값은  $b_{21}^{(t)}$ 로 표시한다.

$$m_{21}^{(t)} = [p^{(t)} - q_2^{(t-1)} \cdot \{m_0^{(t)}m_1 / (m_0^{(t)} + m_1)\} - b_{21}^{(t-1)}] / q_2^{(t)} \quad (14)$$

$$b_{21}^{(t)} = p^{(t)} - m_{21}^{(t-1)}q_2^{(t)} - q_2^{(t-1)} \cdot \{m_0^{(t)}m_1 / (m_0^{(t)} + m_1)\} \quad (15)$$

식 (14)와 식 (15)의 추정방법은 전단계의 시장실적과 추정된 정보가 활용되기 때문에 반복적인 계산에 의해 수렴된 값은 초기조건에 따라 영향을 받는다. 그러므로 경쟁의 균형상태도 유일(unique)하지 않다. 하지만 시장참여자의 균형조건을 활용하여 유도하였기 때문에 완비시장의 균형점 근처에서 다양한 균형상태가 발생할 것이다. 그렇다 할지라도 어느 상태가 정확히 추정된 상태인지를 알기란 어렵다. 그러므로 이를 개선시키기 위한 추가적인 분석이 필요하다.

**4.2 부하패턴의 변화를 고려한 개선된 추정기법**

앞 절에서 제안한 추정방법은 식의 부족으로 인해 추정의 정확성을 보장할 수 없다. 본 연구는 이에 대한 해결방안으로 아래와 같은 상황에 관심을 두고 추정의 정확성을 높인다.

MO는 표 2와 같이 과거 동일시점의 수요함수를 이용하여 거래시점의 수요함수를 예측한다. 그러므로 발전기업은 예측된 수요함수와 동일했던 과거의 시장실적을 활용하여 입찰전략을 수립할 것이다. 또한, 거래량과 거래가격의 변화가 없을 만큼 경쟁이 충분히 진행된 경우, 발전기업의 입찰전략은 과거 동일시점의 입찰전략과 같을 것이다. 하지만, 예측된 수요함수와 실제 수요함수가 불일치하는 상태가 나타나는 시점에서는 발전기업이 동일한 입찰전략을 제출하더라도 전력가격과 거래량은 서로 다르게 결정된다. 이와 같은 상황을 가정으로 설정하면 가정 3과 가정 4와 같다.

**가정 3.** 수요함수의 예측은 예상치 못한 외부요인이 발생하여 부정확할 수 있다.

**가정 4.** 동일하게 예측된 수요함수에 대해 발전기업이 제출하는 입찰전략은 일정하다.

가정 3은 수요예측에 관련된 것으로, MO가 시장환경의 변화를 예상하지 못하여 발전기업이 정확한 수요함수를 이용하지 못하고 부정확한 수요함수를 이용하여 입찰전략을 결정하는 것을 의미한다. 그리고 가정 4는 발전기업의 입찰전략에 관한 것으로, 부하패턴이 일정한 경우 발전기업이 제시하는 입찰전략은 각 시간에서의 수요함수마다 정해져있는 것을 의미한다.

편의상, d-1일에 예측된 수요함수와 d일에 예측된 수요함수는 동일하지만 d일에 부하패턴이 변하여 d일에 예측된 수요함수는 부정확하다고 가정한다.

전력거래가 결정되는 식 (7)은 수요함수가 정확하게 예측된 경우(d-1일)와 부정확하게 예측된 경우(d일)로 나누어 표현할 수 있으며 아래 식 (16)과 식 (17)과 같다.

$$k_{21}^{(d-1)} + m_2q_2^{(d-1)} = p^{(d-1)} \quad (16)$$

$$k_{21}^{(d)} + m_2q_2^{(d)} = p^{(d)} \quad (17)$$

두 식에서  $G_1$ 이 알 수 없는 정보는  $k_{21}^{(d-1)}$ ,  $k_{21}^{(d)}$ ,  $m_2$ 이지만, 가정 4의 추가로 인해, d-1일과 d일의 입찰전략은 같게 나타난다. 즉,  $k_{21}^{(d-1)} = k_{21}^{(d)}$ 의 관계가 성립하므로 두 식은 변수 2개로 구성되어 정확한  $k_{21}$ ,  $m_2$ 를 계산할 수 있다. 식 (16)과 식 (17)을 연립하여  $m_2$ 에 대해 정리하고 d일에 정확한 추정이 이루어진다는 것을 나타내기 위해  $m_2$ 대신  $m_{21}^{(d)}$ 로 바꾸어 표현하면 식 (18)과 같다.

$$m_{21}^{(d)} = (p^{(d)} - p^{(d-1)}) / (q_2^{(d)} - q_2^{(d-1)}) \quad (18)$$

식을 이용하여  $m_{21}^{(d)}$ 을 계산하기 위해서는 수요함수가 급격히 변화되는 경우에만 가능하다. 즉, 전력거래량의 차이에 직접적인 영향을 주는 수요함수의 예측오차가  $m_{21}^{(d)}$ 가 계산될 만큼의 값을 가져야한다.

반면,  $b_2$ 는 식 (12)와 같은  $G_2$ 의 입찰전략  $k_{21}$ 에 의해 추정할 수 있다. 식 (12)를  $b_2$ 에 대해 정리하면,  $G_1$ 이  $b_2$ 를 추정하는 식이 유도되며 아래 식 (19)와 같다.

$$b_{21}^{(d)} = \{m_0^{(d)}m_1 / (m_0^{(d)} + m_1)\}q_2^{(d-1)} - k_{21}^{(d)} \quad (19)$$

$b_{21}^{(d)}$ 의 추정은 전력거래 정보뿐 아니라  $m_1$ 에 의해서도 영향을 받는다. 여기서  $m_1$ 은 앞 절에서 설명하였듯이, 경쟁기업  $G_2$ 가 추정하는  $m_1$ 으로  $G_1$ 이 이를 알 수 없기 때문에 실제  $m_1$ 으로 가정한 값이다. 하지만, 경쟁기업의 한계비용함수 기울기가 식 (18)에 의해 정확히 추정된다면,  $m_1$ 에 대한 가정은 실제와 일치하게 된다. 즉, 한계비용함수 기울기가 정확히 추정된다면, 한계비용함수 절편도 식 (19)에 의해 정확히 추정할 수 있다.

**5. 사례연구**

**5.1 대상모형**

대상모형으로 발전력 제약이 없는  $G_1$ ,  $G_2$ 가 공급경쟁에 참여하고 수요는 하나의 집중된 수요함수로 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. 또한 선로제약 등의 제약조건은 고려하지 않는다.

수요함수는 가격탄력성을 반영하기 위해 일차함수로 고려한다. 사례연구에서 고려하는 수요함수는 기울기를  $m_0 = 0.5$ 로 고정한 상태에서 절편  $b_0$ 를 100을 기준으로 10일까지는 거래일마다 0.1%이내에서 난수를 발생시킨다. 그리고 수요함수의 절편  $b_0$ 가 예상하지 못한 요인에 의해 11일에는 5%정도 변화되며 MO는 이를 예상하지 못하였다고 가정한다. 즉, 수요함수의 절편이  $b_0=100$ 에서  $b_0=105$ 로 변화된다고 고려하며 변화된 수요함수는 18일까지 0.1% 범위에서 유지된다고 가정한다.

수요함수가 미세하게 변동되는 경우, 수요함수의 예측은

비교적 정확할 것이다. 그러므로 수요함수의 변화가 미세한 10일까지는 수요함수가 비교적 정확히 예측되었다고 고려한다. 하지만, 11일에 발생한 변동요인을 MO가 예상하지 못하므로 11일에 예측된 수요함수는 10일에 예측된 수요함수와 유사하다. 하지만, 11일에 예측한 수요함수는 실제와 큰 차이가 나타난다. 반면, 12일에는 11일에 발생한 요인을 MO가 지각하고 있어서 12일 이후부터는 정확히 예측된다.

사례연구에 적용한 수요함수의 절편은 그림 1과 같으며 그림에서 점선은 예측된 수요함수 절편을 의미하며 실선은 실제 수요함수의 절편을 의미한다. 그리고 그림 1의 가로축은 동일 시점에 대한 거래일의 변화를 의미하고 세로축은 거래일의 변화에 따른 수요함수의 절편을 의미한다.

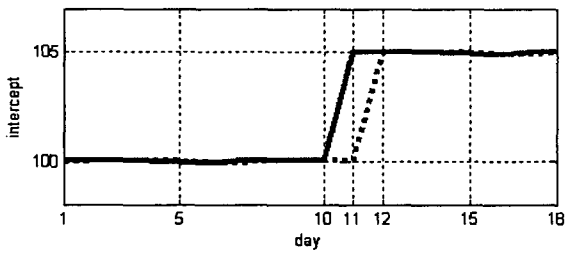


그림 1 수요함수의 절편  
Fig. 1 Intercepts of demand functions

부하패턴이 일정하여 수요함수가 정확히 예측되는 10일까지는 식 (14)와 식 (15)를 이용하여 추정을 시도하고 수요 예측이 실제와 차이를 보이는 11일부터는 식 (18)과 식 (19)를 이용하여 추정을 시도한다.

### 5.2 추정결과

수요함수가 정확히 예측되는 10일까지는, 4.1절의 식 (14)와 식 (15)를 이용하여 추정을 시도할 수 있는데, 균형상태는 초기조건 즉, 첫 입찰전략과 초기에 경쟁기업의 한계비용함수를 어떻게 추정하였느냐에 따라 다양한 결과가 나타난다. 사례연구에서는 첫 입찰전략을 자신의 한계비용함수 절편으로 선택하고 경쟁기업의 한계비용함수가 자신과 같다고 가정한 상태에서 경쟁을 분석한다. 이때의 추정과정과 거래량의 변화는 다음 그림 2와 같다. 그림 2에서 가는 실선은 불완비시장에 적용한 결과를 의미하고 굵은 실선은 완비시장의 균형상태 및 실제 발전특성을 의미한다.

다음 그림 2와 같이 경쟁기업의 한계비용함수 추정은 거래시작 8일후에 일정하게 수렴한다. 수렴된 추정 값은  $m_{21}^{(8)}=0.24$ ,  $b_{21}^{(8)}=5.9$ ,  $m_{12}^{(8)}=0.25$ ,  $b_{12}^{(8)}=15.6$ 으로 실제 한계비용함수  $m_2=0.25$ ,  $b_2=10$ ,  $m_1=0.45$ ,  $b_1=5$ 와 큰 차이가 있다. 또한, 경쟁기업의 입찰전략을 어떻게 생각하고 있는지는 추정된 한계비용함수를 이용하여 계산할 수 있는데, 이를 계산해보면  $k_{21}^{(8)}=22.05$ 와  $k_{12}^{(8)}=24.7$ 로 실제 제출되는 입찰전략  $k_2^{(8)}=21.5$ ,  $k_1^{(8)}=13.9$ 와 차이를 보인다. 이와 같이 부정확한 상태에서 수렴하는 이유는 추정에 필요한 식이 부족할 뿐 아니라 경쟁기업의 추정정보(식 (12)에서  $m_1$ )도 모르기 때문에 발생한

다. 반면, 완비시장의 입찰전략은  $k_1=14.5$ ,  $k_2=24.73$ 에서 미세하게 변동된다. 결과적으로 부정확한 추정에 의해  $G_1$ ,  $G_2$ 는 완비시장의 균형전략을 선택하지 못한다.

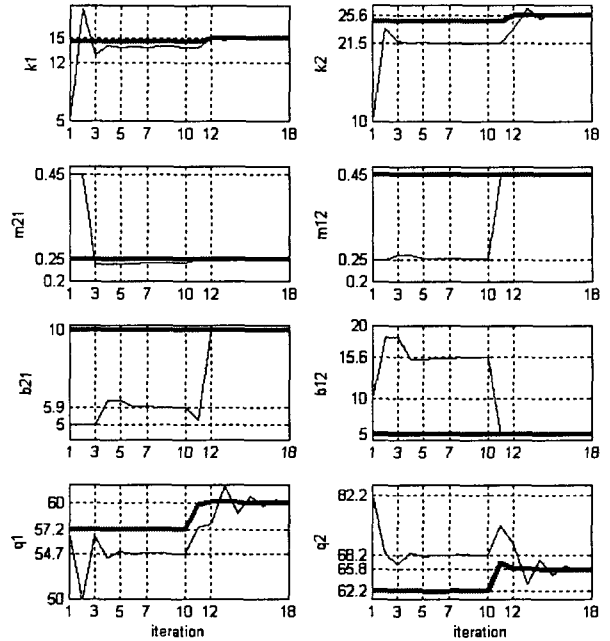


그림 2 완비시장과 불완비시장의 비교  
Fig. 2 Comparisons of CIM and IIM

수요함수는 거래시작 11일에 크게 변동되며 이로 인해 경쟁의 수렴상태는 이탈하게 된다. 이때에는 식 (18)과 식 (19)를 이용하여 추정을 시도할 수 있으며 거래일 11일에 한계비용함수 기울기가 정확히 추정되는 것을 알 수 있다. 또한, 한계비용함수의 절편은 앞 절의 식 (19)에서 설명하였듯이 기울기가 정확히 추정된 후에 정확한 추정이 이루어지기 때문에 12일에 정확한 값을 알 수 있다. 단,  $b_{12}^{(11)}$ 은 그림 2에서 실제  $b_1$ 과 매우 비슷하지만  $b_{12}^{(11)}$ 은 4.79로 정확한  $b_1=5$ 의 값이 아니다. 반면, 정확한 추정이 이루어진 후 수렴한 18일의 입찰전략은  $k_1^{(18)}=15$ ,  $k_2^{(18)}=25.6$ 으로 완비시장과 거의 같다. 이는 수요함수의 예상치 못한 급격한 변화로 인해 한계비용함수가 정확히 추정되어 나타나는 것이다.

발전기업은 MO가 예측한 수요함수를 바탕으로 입찰전략을 수립한다. 때문에 예측된 수요함수가 비슷한 10일과 11일의 완비시장 입찰전략은 ( $k_i^{(10)} \cong k_i^{(11)}$ )은 거의 같은 것을 알 수 있다. 하지만 입찰전략은 동일하더라도 10일의 수요함수와 11일의 수요함수는 그림 1과 같이 실제로 5%정도 차이가 나타난다. 이로 인해, 거래량은 그림 2와 같이  $q_i^{(10)} \neq q_i^{(11)}$ 의 관계가 나타난다.

수요함수의 예측은 변동이 발생하는 시점(11일)에서는 부정확하지만, 발생한 이후(12일)에는 그림 1과 같이 비교적 정확히 예측할 수 있다. 그러므로 완비시장에서 경쟁기업의 비용특성을 알고 있다할지라도, 11일에 제출하는 입찰전략과 12일에 제출하는 입찰전략은 서로 다르고 이로 인해 거래량도 차이가 나타난다.

이상을 정리하면, 수요함수가 변동으로 인해 경쟁기업의 발전특성이 정확히 추정  $(m_{ij}^{(12)}, b_{ij}^{(12)}) = (m_i, b_i)$  되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 정확한 추정으로 인해 불완비시장의 입찰전략이 내쉬균형 조건을 이용하여 계산된 완비시장의 입찰전략과 동일함을 확인할 수 있었다.

### 6. 결 론

본 연구는 전력시장에서 나타나는 정보의 불완비성에 초점을 맞추어 진행하였다. 이를 위해 경쟁기업의 한계비용함수와 입찰함수를 알고 있는지 모르고 있는지 여부에 따라 완비시장과 불완비시장으로 구분하였다. 그리고 불완비시장에서 경쟁기업의 한계비용함수를 추정하는 방법을 제안하였다.

한계비용함수의 추정은 전력시장에서 알 수 있는 가격과 거래량 정보를 활용하여 이루어져야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 일정한 패턴이 반복되는 수요함수를 바탕으로 입찰전략 수립식과 전력거래량 결정과정을 나타내는 식을 연립하여 하나의 식으로 구성하고 한계비용함수를 추정하는 식을 유도하였다. 하지만, 정보의 부족으로 인해 부정확한 추정이 이루어졌으며 완비시장의 균형전략과 큰 차이가 나타난다.

부정확한 추정을 개선시키기 위해 본 연구는 수요함수가 예측치 못한 요인에 의해 변동되는 상황을 고려하였다. 그리고 고정된 수요함수에서 유도된 추정식을 수요함수의 변동 전후로 구분지어 표현하고 다시 두식을 연립하여 한계비용함수를 추정하는 식을 유도하였다. 제안한 기법을 사례계통에 적용한 결과, 경쟁기업의 발전비용 특성에 관한 정확한 추정이 이루어졌으며 이로 인해 불완비시장의 입찰전략이 내쉬균형 조건을 만족하게 됨을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-110)주관으로 수행된 과제임.

### 참 고 문 헌

[1] 한국전력거래소, *전력시장운영규칙*, <http://www.kpx.or.kr>.  
 [2] J. H. Shin and K. H. Lee, "Analysis on Incomplete Information in an Electricity Market using Game Theory," KIEE Trans. vol. 55A, no. 5, pp. 214-219, May. 2006.  
 [3] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game theory*, MIT Press, 1991.  
 [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] R. Rerrero, J. Rivera and M. Shahidepour, "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.  
 [6] P. D. Klemperer and M. A. Meyer, "Supply Function Equilibria in Oligopoly Under Uncertainty," Econometrica, vol. 57, no. 6, pp. 1243-1277, Nov. 1989.  
 [7] 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.  
 [8] D. J. Kang, J. Hur, T. H. Kim, Y. H. Moon, K. D. Lee, K. H. Chung and B. H. Kim, "The Method for Inverse Demand Curve of Cournot Model in Electricity Market," KIEE Trans. vol. 54A, no. 2, pp. 70-87, Feb. 2005.  
 [9] H. Niu and Ross Baldick, "Supply Function Equilibrium Bidding Strategies with Fixed Forward Contracts," IEEE trans. on Power System, vol. 20, no. 5, pp. 1859-1867, Nov. 2005.

## 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