

불완비 정보의 전력시장에 대한 연구

신재홍*, 이광호
 단국대학교 전기공학과

A Study on the electricity Market with incomplete information

Jae-Hong Shin, Kwang-Ho Lee
 Dept. of Electrical Engr. Dankook University

Abstract - Electric power industry throughout the world is restructured. The electric power industry has a characteristics of an oligopoly with an imperfect competition. In Korea rules, all information is not available. So the strategy under such incomplete information market differ firm those under complete information system in game theory.

This paper presents a analysis technique if Korea market model with incomplete information.

1. 서 론

현재 전력시장운영규칙은 시장참여자의 요청이 있을 경우 정보공개위원회의 회의를 통해 전력거래량, 전력시장 가격 및 전력수요 전망, 전략 등을 공개하도록 명시하고 있다. 단 정보공개를 통해 타 시장참여자에게 피해가 발생할 우려가 있는 경우에는 공개대상에서 제외된다[1].

시장운영자가 공개하는 정보에 따라 완비정보(complete informaion)와 불완비정보(incomplete deption) 전력시장으로 구분된다. 완비정보 전력시장은 전력시장에 관련된 모든 정보를 공개하는 것을 의미한다. 반면 불완비 정보 전력시장은 발전기업의 전략 등의 정보 중 미공개 되는 정보가 존재하는 경우를 의미한다.

불완비정보에서의 전력시장에 관한 주요 연구는 상대 기업의 전략을 공개하고 한계비용합수를 공개하지 않는 전력시장에서 송전선로제약을 고려한 전력시장 특성에 관한 것이다[2,3]. 송전선로 제약을 고려함에 따라 발전기업의 보수합수가 비선형적으로 나타난다[4]. 따라서 이득극대화 전략수립은 해석적인계산이 아닌 확률적인 기대보수개념을 통해 이루어진다. 하지만 현실적으로 발전기업은 상대기업의 전략에 따른 우수만을 계산하지 않고 상대기업의 비용합수를 계속 추정하고 추정된 정보에 따라 자신의 이득을 극대화 시키는 전략을 결정하게 된다.

본 연구에서 발전기업의 입찰 모형은 공급함수법 [2,3][4,5]을 사용하고 수요곡선은 일차함수로 탄력성을 부여한다. 이를 통해 정보공개 범위에 따른 전력시장의 균형점을 분석한다. 최종적으로 전략도 비공개되는 전력 시장에서 나타나는 균형점 분석을 시도한다. 또한 사례 연구를 통해 정보공개 범위에 따른 전력시장을 완비정보 전력시장과 비교한다.

2. 전력시장 정보의 공개

본 연구에서 발전기업의 한계비용합수와 입찰함수 그리고 수요곡선은 선형일차함수로 가정한다. 발전기업 i 의 한계비용합수 C_i 는 전력의 거래량 q 에 따라 기술기 m_i , 절편 b_i 를 갖는 $C_i(q)=m_iq+b_i$ 형태로 정의하고 입찰함수 g_i 는 한계비용합수의 기울기를 고정시키고 절편 k_i 만을 전략적으로 선택하는 $g_i(q)=m_iq+k_i$ 로 가정한다. 마지

막으로 수요곡선 D 는 수요량 d 에 따라 탄력성을 갖는 $D(d)=b_0-m_0d$ 로 정의한다.

불완비정보 전력시장은 한계비용이 비공개되는 경우와 한계비용과 전략이 모두 비공개되는 경우로 나누어 표 1과 같이 정보공개범위를 설정한다. 반면 전력의 거래가격과 거래량, 수요곡선은 항상 공개하는 것으로 한다.

표 1 정보공개범위

구분	정보공개	정보비공개
	$p, q, k, m_i, b_i, m_0, b_0, d$	해당사항 없음 (이하 완비정보)
	p, q, k, m_0, b_0, d	m_i, b_i (이하 한계비용 불완비정보)
	p, q, m_0, b_0, d	k_i, m_i, b_i (이하 전략 불완비정보)

m_i : 발전기업 i 의 한계비용합수 기울기,
 b_i : 발전기업 i 의 한계비용합수 절편
 p : 전력거래가격, m_0 : 수요곡선의 기울기
 k_i : 발전기업 i 의 전략, d : 수요량
 b_0 : 수요곡선의 절편, q : 발전기업 i 의 전력거래량

표 1에서 $\textcircled{1}$ 은 발전기업이 전력시장에 관련된 모든 정보를 알 수 있는 경우를 의미하므로 완비정보 전력시장이라 표현한다. 그리고 사례연구에서 불완비정보가 존재하는 $\textcircled{2}, \textcircled{3}$ 의 비교대상으로 고려한다.

$\textcircled{2}$ 은 k_i, p, q 와 수요곡선은 공개하지만 한계비용합수는 공개하지 않는 경우를 의미한다. 이러한 경우 발전기업은 상대기업의 한계비용합수를 추정하고 이득극대화 전략을 수립하고자 한다. 따라서 상대기업의 한계비용합수 추정기법은 공개된 p, q, k_i 의 정보를 이용하여 고안되어야 한다.

$\textcircled{3}$ 은 k_i 와 한계비용합수를 공개하지 않고 p, q 와 수요곡선만을 공개하는 경우를 의미한다. $\textcircled{2}$ 의 경우와 비교하여 볼 때, 발전기업은 p, q 만을 알 수 있고 전략을 알 수 없으므로 상대기업의 비용합수 추정은 더욱 난해해진다. 본 연구에서는 가정된 상대기업의 한계비용합수를 통하여 전략을 결정하고 반복적인 입찰을 통하여 가정한 한계비용합수를 갱신(update)해나가는 방법을 사용한다.

3. 완비정보의 내쉬균형

계통모형은 두개의 발전기업 G_1, G_2 가 전력시장에 참여한 것을 대상으로 하며 발전력제약 및 송전선로제약 등은 고려하지 않는다. 또한 시장운영자는 전력시장에 관련된 모든 정보를 발전기업에게 공개한다.

시장운영자는 발전기업이 제시한 입찰함수를 한계비용합수로 가정하여 사회적후생(social welfare; SW)을 극대화시키는 p, q 를 결정한다. 이를 수식으로 전개하여 q 에 관해 정리하면 식 (1)과 같다[4,5].

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

식 (1)에서 $\Delta = m_1 m_2 + m_2 m_0 + m_1 m_0$ 이다. 또한 k_1^n, q_1^n 은 n 번째 입찰시 제출되는 G_1 의 전략과 입찰을 통해 결정되는 전력거래량을 의미한다.

한편, G_1 는 이득을 극대화시키는 k_1^n 를 결정한다. 이득을 극대화시키는 k_1^n 는 이득을 k_1^n 로 편미분함으로써 계산할 수 있으며 식으로는 식 (2)와 같다.

$$k_1^n = \frac{m_0 m_2}{m_0 + m_2} q_1^n + b_1, \quad k_2^n = \frac{m_0 m_1}{m_0 + m_1} q_2^n + b_2 \quad (2)$$

시장운영자의 SW 극대화 목적과 G_1 의 이득극대화 목적을 동시에 만족하는 k_1^n 은 식 (1)과 식 (2)를 연립하여 계산할 수 있다. 이를 정리하면 식 (3)과 같다[4,5].

$$\begin{pmatrix} k_1^n \\ k_2^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (m_2 + m_0)(\Delta + m_2 m_0) & -m_2 m_0^2 \\ -m_1 m_0^2 & (m_1 + m_0)(\Delta + m_1 m_0) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta m_2 + m_0 b_1 + m_2^2 m_0 b_0 \\ \Delta m_1 + m_0 b_2 + m_1^2 m_0 b_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

완비정보 전력시장은 전력시장에 관련된 모든 정보가 공개되므로 식 (3)에 나타난 k_1^n 의 값은 간단히 계산된다. 따라서 식 (3)의 k_1^n 는 완비정보 전력시장에서의 내쉬균형 전략이다.

4. 불완비정보의 추정기법

4.1 한계비용 불완비정보 전력시장 추정기법

정보공개 범위를 제외한 계통모형은 3절과 동일하다. 전력의 거래가격은 송전선로 등의 제약이 없는 경우 발전기업의 공급함수에 대하여 동일한 가격에서 결정[4,5]되므로 G_1 는 G_2 의 한계비용함수 기울기 m_2 를 식 (4)와 같이 추정할 수 있다.

$$m_2^n = (p^n - k_1^n) / q_1^n \quad (4)$$

여기서 m_2^n 는 n번째 입찰을 통해 G_1 가 G_2 의 한계비용함수 기울기 m_2 를 추정한 값을 의미한다. 또한 p^n 은 n 번째 입찰을 통해 결정되는 전력의 가격을 의미한다.

한계비용 불완비정보 공개범위를 고려해 볼 때, G_2 가 추정하는 m_2^n 값은 실제 m_2 와 같은 값이 계산된다.

m_2^n 를 추정할 수 있는 경우, G_2 는 시장운영자에 의해 공개되는 정보와 m_2^n 을 통해 $k_1^{(n+1)}$ 을 수립하고자 한다. 이득 극대화 전략은 식 (2)나 식 (3)을 사용하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 식 (3)이 상대기업의 한계비용함수 절편을 추정할 값이 필요하므로 변수의 증가를 막기 위해 식 (2)를 통해 $k_1^{(n+1)}$ 을 결정한다.

식 (2)를 고려해볼 때, $k_1^{(n+1)}$ 은 $q_1^{(n+1)}$ 로 구성되어 있다. 하지만 $q_1^{(n+1)}$ 의 값은 $k_1^{(n+1)}$, $k_2^{(n+1)}$ 이 제출되어야 알 수 있는 값이므로 본 연구에서는 $q_1^{(n+1)}$ 대신 q_1^n 을 대입하여 전략을 계산한다. 이를 정리하면 식 (5)과 같다.

$$k_1^{(n+1)} = \frac{m_0 m_2^n}{m_0 + m_2^n} q_1^n + b_1 \quad (5)$$

식 (5)에서 나타난 m_2^n 는 m_2 와 같은 값을 가진다. 본 연구는 게임이론적 관점에서 전력시장을 분석하므로 합리적인 발전기업이 전력시장 공급경쟁에 참여하는 것을 기본 전제로 한다. 이는 G_2 도 식 (5)에 나타난 $k_1^{(n+1)}$ 의 결정과정과 같은 방법으로 $k_2^{(n+1)}$ 를 결정한다는 것을 의미한다. 따라서 G_2 는 n+1번째 입찰이 이루어졌을 때 식 (6)과 같은 방법으로 b_2 를 추정할 수 있다.

$$b_2^{(n+1)} = k_2^{(n+1)} - \frac{m_0 m_1}{m_0 + m_1} q_2^n \quad (6)$$

여기서 $b_2^{(n+1)}$ 은 n+1번째 입찰을 통해 G_2 가 b_2 를 추정할 값을 의미한다.

식 (6)의 우변에 관련된 변수는 한계비용 불완비정보 전력시장에서 G_2 가 알 수 있는 값으로 구성되어 있다. 따라서 $b_2^{(n+1)}$ 는 실제 b_2 와 동일하게 계산된다.

4.2 전략 불완비정보 전력시장 추정기법

정보공개 범위를 제외한 계통모형은 3절과 동일하다. 전략 불완비정보 전력시장에서 시장운영자는 계통상의 제약이 없는 경우 발전기업이 제시한 공급함수에 대해 동일한 가격에서 전력의 거래량을 결정[4,5]하고 이를 발전기업에게 공개한다. 하지만 발전기업의 전략과 한계비용함수는 공개하지 않는다. 따라서 발전기업은 상대기업의 입찰함수를 적절히 가정하여 식 (7)과 같은 p 와 입찰함수의 관계를 도출한다.

$$p^n = k_2^n + m_2^n q_2^n \quad (7)$$

여기서, k_2^n 는 G_2 가 n번째 입찰에서 제시된 k_2 를 추정할 값이다.

본 연구에서 전략 불완비정보 전력시장의 입찰전략은 한계비용 불완비정보 전력시장을 이용하여 수립한다. 즉, 전략 불완비정보 전력시장에서의 입찰전략은 식 (5)를 사용한다.

G_2 가 식 (5)에 나타난 $k_1^{(n+1)}$ 를 추정하는 과정을 살펴보면 G_2 가 m_2 를 추정할 m_2^n 를 다시 추정해야하는 새로운 변수가 필요하다. 하지만 본 연구에서는 변수의 증가를 막기 위해 m_2^n 를 재추정하는 변수 대신 실제 자신의 한계비용함수 기울기 m_2 를 대입한다.

이를 G_2 가 k_1^n 를 추정하는 방법으로 재정리하면 식 (8)과 같다.

$$k_1^n = \frac{m_0 m_1}{m_0 + m_1} q_1^{(n-1)} + b_1^{(n-1)} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)을 연립하여 m_2^n 과 b_2^n 으로 정리하면 각 식 (9), 식 (10)과 같이 나타난다.

$$m_2^n = [p^n - q_1^{(n-1)} \cdot \{m_0 m_1 / (m_0 + m_1)\} - b_1^{(n-1)}] / q_1^n \quad (9)$$

$$b_2^n = p^n - m_2^n q_1^n - q_1^{(n-1)} \cdot \{m_0 m_1 / (m_0 + m_1)\} \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)을 고려해 볼 때 m_2^n 와 b_2^n 은 상호작용의 관계를 가지고 있다. 따라서 입찰에 따라 m_2^n 과 b_2^n 을 번갈아 추정하고 갱신(update)하는 기법을 사용한다.

5. 사례연구

5.1 한계비용 불완비정보 전력시장에서의 적용

대상계통은 발전력 제약이 없는 발전기업 G_1 , G_2 가 전력시장에 참여하고 수요는 하나의 집중된 수요함수로 가정한다. 그리고 G_1 , G_2 는 각각 $m_1=0.45$, $b_1=5$, $m_2=0.25$, $b_2=10$ 의 한계비용곡선을 갖는다. 수요곡선은 $m_0=0.5$, $b_0=100$ 의 일차함수로 가정한다. 선로제약 등의 제약조건은 고려하지 않는다.

본 연구에서 제안한 추정기법과 전략 수립과정을 이용하여 전력시장에 적용한 결과, 다음 표 2과 같이 전략이 변화되게 된다.

표 2 한계비용 불완비정보 전력시장의 적용

n	k_1^n	k_2^n	q_1^n	q_2^n	p^n	Profit ₁	Profit ₂	Benefit	SW
1	10	5	43.24	97.84	29.46	636.96	707.34	9132.1	6593.2
2	12.21	33.17	70.12	42.36	43.76	1611.7	1205.8	8084.9	4493.3
3	14.54	24.73	57.22	62.21	40.29	1282.4	1400.3	8377.1	4786.2

표 2에서 n는 입찰의 순번을 의미한다. 첫 번째 전략 k_1^0 은 임의의 값 $k_1^0=10$, $k_2^0=5$ 로 가정한다.

첫 번째 입찰이 완료된 후 발전기업은 전력의 거래가격과 거래량, 첫 번째 전략을 알 수 있으므로 식 (4)를 이용하여 상대기업의 한계비용함수 기울기를 계산할 수 있다. 따라서 두 번째 전략은 자신의 한계비용함수 절편과 상대기업의 한계비용함수 기울기가 고려된 식 (5)를 통하여 계산된다. 각각의 값은 $k_1^1=12.21$, $k_2^1=33.17$ 로 나타난다.

두 번째 입찰이 완료된 후 발전기업은 상대기업의 두 번째 전략을 분석함으로써 상대기업의 한계비용함수 절편을 식 (6)을 통해 계산할 수 있다. 결국 두 번의 입찰을 통해 상대기업의 한계비용함수를 알 수 있으므로 세 번째 전략은 완비정보 전력시장에서의 균형전략인 식 (3)을 통해 계산된다.

본 연구에서 제안한 전략 수립과정은 초기 값의 영향을 많이 받는다. 따라서 첫 번째, 두 번째 입찰을 통한 발전기업의 이득 및 사회적후생, 소비자만족을 나타내는 소비자잉여(Benefit)는 한계비용함수와 일정한 관계가 나타나지 않는다. 하지만 균형전략인 세 번째 전략은 상대기업의 한계비용함수를 추정한 후 제출되는 값이므로 발전기업의 이득과 사회적후생, 소비자잉여는 발전기업의 한계비용에 따라 일정한 영향을 받게 된다.

5.2 전략 불완비정보 전력시장에의 적용

사례계통 모형은 정보공개범위를 제외한 5.1절과 동일하다. 시장운영자는 전략을 공개하지 않고 b_1^0 , q_1^0 , 수요곡선만을 공개하는 전력시장을 대상으로 한다.

첫 번째 입찰전략은 자신의 한계비용함수 절편을 사용한다. 그리고 상대기업에 대한 초기의 한계비용함수 기울기 추정 값은 자신과 동일하다고 가정한다. 이를 구체적인 값으로 나타내면 $k_1^0=5$, $k_2^0=10$, $m_{21}^0=0.45$, $m_{12}^0=0.25$ 와 같다.

본 연구에서 제안한 추정기법을 사용하여 입찰을 반복함에 따라 그림 1와 같이 나타난다.

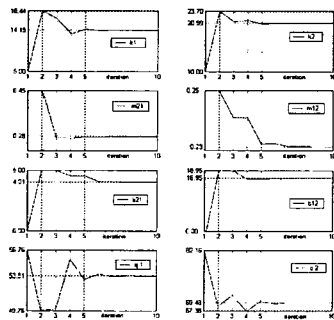


그림 1 전략 불완비정보 전력시장의 적용

그림 1은 입찰을 반복함에 따라 상대기업의 한계비용 추정 값 그리고 전략과 전력거래량의 변화를 나타낸다.

본 연구에서는 b_2^0 와 m_2^0 의 값을 반복적으로 추정하므로 두 번의 입찰을 주기로 b_2^0 와 m_2^0 가 변화되는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 1을 통해 작수 입찰에서는 $b_2^{(even)}$ 의 값이 추정되고 홀수 입찰에서는 $m_2^{(odd)}$ 가 추정됨을 알 수 있다. 일정한 수렴조건을 만족하는 입찰전략은 5.1절의 균형전략과 약간 다른 $k_1=14.14$, $k_2=20.99$ 이고 한계비용함수 추정 값은 $m_{21}=0.26$, $m_{12}=0.23$, $b_{21}=4.01$, $b_{12}=16.95$ 이다. 수렴된 k_1 , k_2 를 통해 결정되는 전력거래량은 $q_1=33.81$, $q_2=49.48$ 이고 거래가격은 $p=38.36$ 로 책정된다. 이로 인해 발전기업은 Profit=1143.4, Profit=1368.8와 같은 이득을 얻는다. 또한 사회적후생과 소비자의 만족을 나타내는 소비자잉여는 각각 SW=5054.6, Benefit=8528.7의 값을 가진

다.

사례연구의 수렴상태가 내쉬균형을 만족하는지 여부는 그림 2에 나타나있다.

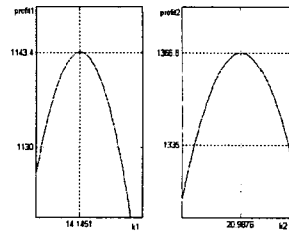


그림 2 전략 불완비정보 전력시장에서의 내쉬균형 확인

수렴상태에서 G_1 은 m_{21} , b_{21} 를 통하여 G_2 의 전략이 $k_{12}=20.47$ 라고 추정하게 되고 G_2 는 G_1 의 전략이 m_{12} , b_{12} 를 통하여 $k_{21}=25.91$ 라고 추정한다. 따라서 수렴상태에서 결정된 전력 가격과 거래량이 외부적인 요건에 의하여 변하지 않으면 추정한 값이 정확한 값이라 판단하고 이에 따른 이득을 계산하게 된다. 결국 그림 2와 같이 추정된 상대기업의 전략에서 이득이 계산되고 이득을 극대화시키는 전략을 바꿀 유인이 존재하지 않게 된다. 따라서 내쉬 균형의 조건과 일치하게 된다.

6. 결 론

본 연구에서 발전기업의 입찰전략은 공급함수의 절편으로 모형화하였다. 또한 도매전력시장을 고려하여 수요에 탄력성을 가정하였다. 계통모형은 전략이 비공개되는 전력시장에서 발전기업의 전략이 해석적인 계산에 의해 결정되도록 송전선 등의 제약은 고려하지 않았다. 이를 통해 한계비용 불완비정보 전력시장과 전략 불완비정보 전력시장에서의 한계비용함수 추정기법과 전략 수립모형을 제시하였다.

사례연구를 통해 한계비용 불완비정보 전력시장의 균형전략은 완비정보 전력시장과 같다는 것을 보였다. 하지만 전략 불완비정보 전력시장에서의 균형전략은 완비정보 전력시장과 다른 균형전략으로 수렴함을 알 수 있었다. 본 연구에서 제안한 불완비정보 전력시장에서의 해석기법은 향후 전력시장의 정보공개범위 설정에 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력거래소, 전력시장운영규칙, <http://www.kpx.or.kr>.
- [2] 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.
- [3] Y. Zhang, J. Fand, F. Hu, S. Chen and Y. Ni, "Analysis of the network constraints' effects on strategic behavior in an inczomplete information environment," International Conference on, Power System Technology, vol. 1, pp. 428-432, Oct. 2002.
- [4] 이광호, "송전선 제약조건에 따른 전력거래에서의 시장지배력 연구," 전기학회논문지, 51A권 8호, pp. 403-409, 2002. 8.
- [5] 조철희, "전력시장 입찰함수모형에서 입찰 파라미터 선택에 관한 연구," 전기학회논문지 53A권 11호, pp. 630-635, 2004. 11.