

전력시장에서 발전가능용량의 전략적 입찰에 대한 게임이론적 해석

論 文

53A-5-7

Analysis on the Strategic Bidding of the Generation Capacity in an Electricity Market by Using Game Theory

李 光 浩*
(Kwang-Ho Lee)

Abstract-As deregulation of power industry is becoming a reality, there has been an intense interest in the strategic bidding for suppliers to maximize their profits. The profit gained by a supplier is related not only to its energy-price bid curve but also to its submitted operational parameters such as generation capacity, etc. So suppliers are willing to use those strategic parameters that can be manipulated by themselves and are effective to their profit. This paper deals with the competition model with compound strategies: generation capacity and bidding curve. The parameter space is modeled by dividing into the two strategies, so the problem is made up of the four types of sub-game in a two player game. This paper analyzes the global Nash Equilibrium (NE) over the whole divisions by computing the sub-game NEs in some divisions and by deriving the best response curves which have discontinuities in other divisions. The global NE is shown to correspond to the Cournot NE where the quantity variable is realized by a constraints of a generation capacity.

Key Words : Electricity Market, Strategic Bid, Generation Capacity, Cournot, Game Theory, Nash Equilibrium

1. 서 론

전력계통에서 송전망이 개방되고 전력시장에서 전력거래가 경쟁적으로 이루어지는 전력산업 구조개편의 흐름은 국내외에서 이미 거스를 수 없는 큰 대세로 인식되고 있다. 국내에서는 그간 많은 준비와 진통을 거쳐 2000년에 전력산업구조개편촉진에 관한 법률의 국회통과로 가시화됐으며 2001년에는 전기위원회 출범, 전력거래소 설립, 발전부문의 6개로 분할 등 발전경쟁체계의 틀을 마련한 바 있다. 또한 경쟁체제하에서 전력시장 및 전력계통의 효율적이고 안정적인 운영에 필요한 사항을 규정한 전력시장 운영규칙[1]이 한국전력거래소에 의해 제정되고 도매전력시장 설계와 운영시스템 구축이 완성됨으로서 전력시장운영의 기본 골격이 갖추어지게 되었다.

이러한 흐름과 국제적인 연구 동향에 따라 국내에서도 경제학과 산업조직론, 게임이론 등이 결합된 전력시장 해석에 관한 연구가 이루어져 왔다[2,3,4]. 지금까지의 연구가 국내 전력시장의 운영방식이 구체화되지 못하여 산업조직의 기본원리를 대상으로 이루어졌다면 이제부터는 한국형 전력시장모형을 대상으로 보다 실제적인 연구가 이뤄져야 할 때이다.

시장원리의 적용으로 전력산업의 효율성이 증대될 수 있는지의 가장 큰 관건은 도매전력시장에서의 발전력공급 경쟁이라 할 수 있다. 전력시장 운영규칙에 의하면 발전회사가 발전기의 기술적 특성과 운전비용특성을 거래소에 제출하고

이를 근거로 운영발전계획이 수립된다.

각 발전기에 대해 제출해야하는 자료는 10가지로 명시[1]되어 있으나 발전사업의 전략적 측면에서 보면 2차함수로 주어지는 비용함수와 발전가능용량이 주요 전략 변수가 된다.

전력시장의 효율성과 거래가격의 안정성을 위해서 비용함수는 비용위원회에서 평가하도록 규정되어 있는 점과 발전기의 특성상 비용함수가 수시로 바뀌지 않는 점을 고려할 때 발전사업자의 전략은 발전가능용량에 모아질 수가 있다. 발전가능용량이 온도나 발전기의 운전 상황에 따라서 변할 수 있음을 운영규칙에서도 어느 정도 인정하기 때문에 발전용량이 전략변수로 사용될 가능성이 높아진다.

발전력공급 경쟁에서의 발전용량에 대한 연구[2,5,6]가 발표된 바 있으나 [3]는 최대용량제약이 내쉬균형에 미치는 영향을 분석한 것이어서 발전사업자가 발전가능용량을 전략변수로 사용하는 문제와는 거리가 있다. 또한 [5]는 중장기적 관점에서 기업이득을 극대화시키는 발전용량 계획을 수립하는 문제라서 발전운영계획 단계에서는 고려되지 않는다. 그리고 [6]은 발전기의 최소출력 지정을 전략변수로 하여 이득의 향상을 분석하는 연구로서 발전기 기동정지를 고려한 시간대별 발전기 운영계획을 세울 때에는 영향을 미치지만 일정시점의 문제에서는 발전가능용량 전략에 비해 균형전략에 미치는 영향이 미약하다.

전력시장 운영규칙에서 도매시장 입찰시 발전기의 실제 비용함수가 반영되도록 규정하고는 있지만 발전 참여자들은 여러 가지 전략을 사용하여 기업의 이득을 극대화시키려 할 것이다. 본 연구에서는 상정 가능한 방법 중에서 발전기의 발전가능용량과 공급함수의 파라미터를 전략적으로 사용하는 경우에 대해 게임이론의 균형점 해석을 통한 특성 분석을 시도한다.

우선 발전비용함수를 고정된 것으로 두고 발전가능용량만

* 正 會 員 : 檀國大 電氣電子컴퓨터工學部 副敎授 · 工博
接受日字 : 2004年 1月 12日
最終完了 : 2004年 3月 3日

을 전략변수로 삼아 경쟁의 균형점을 분석한 후, 발전가능용량과 함께 공급함수모형에서도 전략 파라미터를 정의하여 두 종류의 전략변수가 혼용될 때의 경쟁모형을 수립하고 이에 대한 내쉬균형 계산을 시도한다.

2. 발전가능용량 전략의 게임 해석

2.1 발전가능용량의 입찰변수 모형

전력시장 운영규칙에 의하면 발전비용함수의 열량계수는 매분기마다, 열량단가는 매월 제출하도록 되어 있으며 비용위원회에서 평가하기 때문에 매번 입찰시마다 이를 전략적으로 수정하기가 매우 어렵다. 따라서 본 절에서는 비용관련 함수를 발전기의 실제 비용함수로 가정하고 매 입찰시마다 제출되는 발전가능용량을 전략변수로 두어 경쟁모형을 수립하고 이에 대한 균형전략을 분석한다.

발전력 경쟁을 하는 N 개의 사업자를 F_1, F_2, \dots, F_N 이라 하고 F_i 사업자가 소유한 발전기를 G_i 라 둔다. 발전기 G_i 의 한계비용특성은 일차함수인 $f_i(q_i) = b_i + m_i q_i$ 라 정의하고 전력구매자의 수요특성은 $p_0 = b_0 - m_0 Q$ 로 나타낸다. 여기서 p 는 가격의 단위이고 q는 발전력, Q는 수요전력으로 발전력의 총합과 같다. 사업자가 전략적으로 선택하는 발전가능용량을 q_m 라 둔다. 따라서 본 절에서의 전략변수는 q_m 이다.

발전가능용량 제약을 무시할 때 전력거래의 균형은 비용함수를 대상으로 사회적후생을 최대화하기 때문에 완전경쟁의 내쉬균형과 일치하게 된다. 발전가능용량 전략변수의 특성에 초점을 맞추기 위해서 송전용량 등의 제약조건은 무시한다.

완전경쟁 내쉬균형 상태에서 발전사업자들이 발전가능용량을 이보다 낮게 설정함으로써 이득이 증가하는지를 확인하기 위해 다음과 같이 공급량에 대한 한계이득(marginal profit)을 계산한다.

$$\begin{aligned} \partial \pi_i / \partial q_i &= \partial (pq_i - b_i q_i - 0.5 m_i q_i^2) / \partial q_i \\ &= p - m_0 q_i - b_i - m_i q_i = -m_0 q_i < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 이득 π_i 는 수입(revenue)액인 $p q_i$ 와 비용(cost)인 $b_i q_i + 0.5 m_i q_i^2$ 의 차이로 정의된다.

식(1)은 완전경쟁 균형상태이기 때문에 $p = b_i + m_i q_i$ 이 성립하므로 한계이득은 항상 음의 값을 갖는다. 이는 완전경쟁 균형상태의 발전력(q_{pc}) 보다 적은 양을 공급함으로써 이득이 증가함을 의미한다. 따라서 공급자는 입찰에서 발전가능용량(q_m)을 q_{pc} 보다 낮게 설정하려 할 것이다.

2.2 균형전략 분석

각 발전기의 물리적 최대발전용량이 q_{pc} 보다 크더라도 공급자에게는 발전가능용량을 이보다 낮게 입찰할 유인(incen-tive)이 존재함을 확인하였다. 한편 수요함수와 한계비용함수가 일차함수로 정의될 때 사회적후생은 각 발전량에 대한 오목(concave) 특성을 갖기 때문에 발전용량이 완전경쟁 균형상태보다 낮게 설정되면 용량제약에 의해 균형전략은 발전용

량 q_m 의 상태가 된다.

이와 같이 $q_m < q_{pc}$ 범위에서 공급자가 발전용량을 전략적으로 선택하는 문제는 Cournot 모형에서 공급량을 결정하는 문제와 동일하게 해석된다. 따라서 균형전략 또한 Cournot 모형의 내쉬균형(Nash Equilibrium, NE)과 일치한다.

이러한 논리가 성립하려면 Cournot NE에서의 공급량이 완전경쟁 NE에서의 공급량 보다 항상 작은 값을 가짐을 보여야 한다.

다음은 N=2 일 때의 완전경쟁과 Cournot 모형에서의 균형전략을 비교한 것이다[7].

$$\begin{pmatrix} q_{pc1} \\ q_{pc2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_0 + m_1 & m_0 \\ m_0 & m_0 + m_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_0 - b_1 \\ b_0 - b_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} q_{co1} \\ q_{co2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2m_0 + m_1 & m_0 \\ m_0 & 2m_0 + m_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_0 - b_1 \\ b_0 - b_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

식(2)는 완전경쟁 균형점에서의 공급량을, 식(3)은 Cournot NE에서의 공급량(q_{co})을 유도한 것으로서 행렬의 대각 원소를 비교하면 항상 $q_{co} < q_{pc}$ 임을 알 수 있다. 다수가 참여하는 경우(N>2)일 때에도 식(2)와 (3)의 행렬에서 대각 ($2m_0 + m_i$)과 비대각(m_0) 원소의 규칙이 그대로 유지되기 때문에 $q_{co} < q_{pc}$ 특성은 성립한다.

따라서 전력도매시장에서 모든 참여자가 발전기 비용특성을 실제의 비용함수로 입찰하고 공급가능용량만을 전략적으로 선택하는 경우 균형전략은 Cournot NE 상태에 이르게 된다.

3. 입찰함수와 용량제약의 혼합모형

3.1 입찰함수 전략

전력시장 운영규칙에 의하면 도매시장 입찰에서 발전가능용량의 변동을 어느 정도 인정하고 있는데 비하여 발전기 비용특성은 비용평가위원회에서 결정하도록 하여 실제의 비용함수가 반영될 수 있도록 정하고 있다. 하지만 이러한 제도적 장치만으로는 항상 정확한 실제 비용함수가 반영된다고는 보기 어려우며 어차피 사업자가 제출하는 비용특성 자료를 근거로 하기 때문에 공급입찰 참여자가 전략적으로 비용특성을 조정할 가능성이 있다.

식(3)에서의 Cournot NE 상태에서 비용특성을 조정하여 기업이득을 증가시킬 수 있는지를 알기 위해 다음과 같이 전략변수에 대한 한계이득을 살펴본다. 입찰함수 $f_i(q_i) = k_i + m_i q_i$ 는 절편(k_i)을 전략 파라미터로 하는 공급함수 모형으로 정의한다.

$$\begin{aligned} \partial \pi_i / \partial k_i &= \partial (pq_i - b_i q_i - 0.5 m_i q_i^2) / \partial k_i \quad (p = k_i + m_i q_i) \\ &= m_i q_i \cdot \partial q_i / \partial k_i + q_i \\ &= (1 + m_i \partial q_i / \partial k_i) q_i \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\partial q_i / \partial k_i$ 은 Cournot 균형상태에서 음수가 되며 2인 경쟁모형인 식(3)의 조건에서 b_1 대신 k_1 을 대입하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \partial q_1/\partial k_1 &= 1/\Delta_c \cdot \partial \{(2m_0 + m_2)(b_0 - k_1)\}/\partial k_1 \\ &= -(2m_0 + m_2)/\Delta_c \\ (\Delta_c &= 3m_0^2 + 2m_0m_1 + 2m_0m_2 + m_1m_2) \end{aligned}$$

이를 식(4)에 대입하면 한계이득이 양수임을 알 수 있으며 한계이득이 양수이기 때문에 발전기업은 입찰함수의 전략변수인 절편 k_1 를 증가시키려는 유인을 갖게 된다.

하지만 이는 Cournot NE 상태를 전제로 한 것이며 전략 q_m 은 직접 공급량을 뜻하는 것이 아니고 단순히 최대용량의 의미이기 때문에 q_{mi} 가 고정되어 있더라도 입찰 결과 $q_i < q_{mi}$ 일 수가 있다. 따라서 입찰함수와 용량제약의 혼합모형에서는 식(4)의 값이 양수라고 단정지를 수는 없다. 이를 분석하기 위해서는 혼합모형에 대한 구체적 모형화가 필요하다.

3.2 입찰전략의 혼합모형

발전기업들이 입찰함수의 파라미터를 전략적으로 사용하게 되면 발전가능용량 전략도 영향을 받게 되어 입찰 참여자들이 2가지의 전략변수를 사용하는 혼합모형의 게임현상이 나타난다. 참여자수가 2인인 경우에도 기업이득은 전략변수 4개의 함수로 표현되기 때문에 균형전략을 찾기가 쉽지 않다. 발전가능용량만을 고려하는 경우에는 Cournot 모형으로 해석이 가능하지만 공급함수 모형과 혼합되는 경우에는 발전가능용량이 공급량과 일치하지 않을 수도 있어서 더욱더 균형점 해석이 어려워진다.

혼합모형인 경우 발전가능용량은 제약조건으로 작용하기 때문에 본 연구에서는 공급함수 모형을 근간으로 하면서 발전가능용량을 전략적으로 선택하는 접근방식을 시도한다.

우선, 공급함수 모형에서 전략변수를 k_1, k_2 라 할 때 내쉬 균형점을 살펴보면 다음과 같다[7].

$$\begin{pmatrix} q_{s1} \\ q_{s2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_0 + m_1 & m_0 \\ m_0 & m_0 + m_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -k_1 \\ -k_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_0 \\ b_0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

식(5)의 상태에서 공급량에 대한 한계이득이 모두 음수가 아니면 (q_{s1}, q_{s2}) 이 균형전략이 된다. 용량제약을 사용해서 공급량을 낮춤으로서 이득을 증가시킬 수 없기 때문이다. 하지만 공급량에 대한 한계이득이 음의 값을 가지면 상대방이 q_{sj} 의 전략을 유지할 때 용량제약으로 공급량을 낮추려는 유인을 갖게 된다.

편의상 G1이 발전가능용량 전략변수를 사용하는 경우를 고찰한다. 공급량이 q_{m1} 의 제약조건에 구속되도록 하려 할 때 입찰함수 파라미터 k_1 은 별 의미를 갖지 못한다. 즉 $k_1 = b_1$ 으로 입찰하여도 제약조건에 의해 q_{m1} 의 공급량을 확보할 수가 있기 때문이다. 반대로 발전용량 제약조건 q_m 에 구속되지 않는 경우에는 함수 파라미터 k 에 의해 균형점이 결정된다. 따라서 각 참여자가 q_m 과 k 두 전략변수를 사용하지만 항상 둘 중에서 하나만 활성화되어 유효한 전략이 되고 나머지 하나는 형식적(dummy) 변수로 남는다.

따라서 전략변수 공간은 다음과 같이 4개의 영역으로 구

분된다.

G1	G2	발전용량(q_{m2})	파라미터(k_2)
발전용량(q_{m1})		I	II
파라미터(k_1)		III	IV

그림 1 전략변수 공간의 구분

Fig. 1 Division for strategic variables

그림1의 영역 I에서는 비용함수 파라미터는 실제비용함수와 같게 두고 발전가능용량을 전략변수로 삼아 게임을 벌이는 상황으로서 영역내부에서의 게임현상은 Cournot 모형과 유사하다. 영역 IV에서는 발전가능용량은 실제의 최대발전력으로 두고 비용함수의 파라미터만으로 경쟁을 하는 상황으로서 공급함수 모형에서의 현상과 같다. 한편 영역 II와 III은 한쪽이 발전가능용량으로 다른 한쪽이 입찰함수의 파라미터를 전략변수로 하여 게임을 벌이는 상황이다.

3.3 영역별 최적대응전략

발전용량 전략과 입찰함수 파라미터 전략이 혼합된 모형에서의 내쉬균형을 찾기 위해서는 우선 그림 1의 4개 영역 내부에서 최적대응전략을 분석할 필요가 있다. 영역별 균형점은 이들 최적대응전략의 교점으로 구해지고 전체 내쉬균형은 부분 균형전략 중의 하나이거나 이들의 조합으로 표현되는 복합(mixed) 전략이 되기 때문이다.

영역 I에서의 균형점은 다음과 같은 G1과 G2의 최적대응함수 교점으로 구해진다.

$$\begin{aligned} q_1 &= -m_0q_2/(2m_0 + m_1) + (b_0 - b_1)/(2m_0 + m_1) \\ q_2 &= -m_0q_1/(2m_0 + m_2) + (b_0 - b_2)/(2m_0 + m_2) \end{aligned} \quad (6)$$

영역IV에서의 균형점은 다음과 같은 최적대응함수의 교점으로 구해진다.

$$\begin{aligned} k_1 &= m_0^2m_2k_2/\{\Delta_1(m_0 + m_2)\} + b_1\Delta/\Delta_1 \\ &\quad + b_0m_0m_2^2/\{\Delta_1(m_0 + m_2)\} \\ k_2 &= m_0^2m_1k_1/\{\Delta_2(m_0 + m_1)\} + b_2\Delta/\Delta_2 \\ &\quad + b_0m_0m_1^2/\{\Delta_2(m_0 + m_1)\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\Delta = m_0m_1 + m_1m_2 + m_2m_0$, $\Delta_2 = \Delta + m_0m_1$ 이다.

영역 I과 IV가 과점경쟁에 대한 일반적 분석모형인 반면 영역 II와 III은 새롭게 시도되는 모형이다. 영역 II에서 G2의 전략 k_2 에 대한 G1의 전략 q_{m1} 의 최적대응함수를 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \partial \pi_1/\partial q_1 &= \partial (pq_1 - b_1q_1 - 0.5m_1q_1^2)/\partial q_1 \quad (p = k_2 + m_2q_2) \\ &= \partial p/\partial q_1q_1 + p - b_1 - m_1q_1 = 0 \end{aligned}$$

여기에 수요 공급의 교점인 $b_0 - m_0(q_{m1} + q_2) = k_2 + m_2q_2$ 조건을 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$q_1 = m_0k_2/\Delta_1 + b_0m_2/\Delta_1 - b_1(m_0 + m_2)/\Delta_1 \quad (8)$$

반면 영역 II에서 G1의 발전용량 전략에 대한 G2 파라미터 k_2 의 최적대응 전략은 식(8)과 같은 연속함수로 나타나지 않는다. 그것은 G1의 발전용량 제약이 있다 해도 k_2 의 선택에 따라 입찰결과가 $q_1 = q_{m1}$ 일수도 있고 $q_1 < q_{m1}$ 일수도 있기 때문이다. k_2 가 높은 경우 입찰결과는 높은 가격과 적은 공급량(q_2)이 나타나면서 상대적으로 G1의 공급량이 증가하여 발전용량제약이 구속(binding)되고 k_2 가 낮은 경우에는 낮은 가격과 많은 공급량(q_2)이 나타나면서 상대적으로 G1의 공급량이 감소하여 발전용량제약은 구속되지 않는다. 즉 G2는 k_2 를 사용하여 전자의 고가소량공급 전략 혹은 후자의 저가대량공급 전략을 선택할 수가 있다.

저가대량공급에서는 G1의 용량제약이 영향을 주지 않으므로 G2는 식(7)에서의 공급함수모형 균형전략에 해당되는 하나의 값을 택하게 된다. 반면 고가소량공급에서는 G1의 발전용량에 따라서 k_2 의 최적대응전략은 일차함수로 나타난다. 이러한 구분은 G1 발전용량의 크기에 따라 나뉘어지는데 발전용량이 작을 때 G2는 고가소량공급 전략을 선택하고, 발전용량이 클 때 저가대량공급 전략을 선택한다. 따라서 영역 II에서 G2의 최적대응곡선은 G1의 발전용량 변화에 따른 불연속 모양으로 그림2의 형태가 된다.

4. 내쉬균형점 해석

4.1 광역 내쉬균형점 특성

전략변수가 발전용량과 파라미터 두 종류인 경우, 4가지 부분영역에서의 최적대응전략에 대해 살펴보았다. 게임의 광역 내쉬균형을 구하기 위해서 각 영역에서의 부분게임 균형점에 대한 분석이 필요한데 이와 관련하여 본 연구에서는 두 가지 주장을 하고자 한다.

첫째, 부분영역 I과 IV에서는 단순전략 균형점이 나타나지만 영역 II와 III에서는 최적대응전략의 교점이 형성되지 않는다. (검증은 4.3절)

따라서 영역 II와 III에서는 광역 내쉬균형이 나타나지 않고 영역 I과 IV에서 2개의 단순전략 균형점이 존재한다.

둘째, 부분영역 I과 IV에서 각각의 균형점이 존재하지만 광역 균형점은 영역 I에서 나타난다. (검증은 4.4절)

따라서 전력시장 입찰경쟁에서 발전사업자가 이득을 극대화하기 위해 입찰함수의 파라미터 전략과 발전가능용량 전략을 사용하는 경우, 균형전략은 발전가능용량만을 사용하는 Cournot 모형의 균형전략과 일치하게 된다.

4.2 사례적용 모형

본 연구에서 제안하는 내쉬균형 분석기법을 검증하기 위해 가격탄력성을 갖는 전력입찰시장에서 G1과 G2의 두 발전회사가 공급량 경쟁을 하는 모형에 대해 사례분석을 시도한다. 시장의 수요함수 및 두 발전회사의 실제 비용함수는 다음 표1과 같다.

주어진 조건에 대해 식(2)의 완전경쟁 균형점과 식(3)의 Cournot 모형 균형점을 계산하면 다음과 같다.

$$q_{pc1}=82.2, q_{pc2}=56.8, q_{co1}=53.1, q_{co2}=47.2$$

한편 부분영역 IV에서 파라미터 전략의 최적대응함수는 식(7)에 의해 다음과 같이 계산된다.

표 1. 수요함수와 한계비용함수

Table 1. Demand function and marginal cost functions

	함수 형태	b	m
G1 한계비용함수	$b_1 + m_1 q_1$	10	0.25
G2 한계비용함수	$b_2 + m_2 q_2$	5	0.45
전력수요	$b_0 - m_0 (q_1 + q_2)$	100	0.5

$$k_1 = 0.1722k_2 + 22.23, k_2 = 0.1418k_1 + 11.03$$

따라서 교점으로 구해지는 $(k_1, k_2) = (24.73, 14.54)$ 이 공급함수모형에서의 균형점이 되고 이에 해당되는 발전량은 식(5)에 의해 $q_{sf1} = 62.21, q_{sf2} = 57.22$ 이다.

4.3 지역 내쉬균형점 분석

본 절에서는 부분영역 II와 III에서의 최적대응전략을 계산하여 교점이 발생하지 않음을 보이고자 한다. 부분영역 II에서 G2의 입찰함수 파라미터 전략 k_2 에 대한 G1의 발전용량 전략 q_{m1} 의 최적대응함수는 식(8)에 의해 다음과 같이 계산된다. $q_{m1} = 0.7273k_2 + 51.636$

한편 G1의 용량제약 q_{m1} 에 대한 G2의 전략은 3.3절에서 설명한 바와 같이 입찰결과가 $q_1 < q_{m1}$ 이 되는 저가대량공급 전략과 $q_1 = q_{m1}$ 이 되는 고가소량공급 전략 중 하나를 선택하는 것이다. 저가대량공급 전략에서는 용량제약 범위 이내에서의 균형점이 존재하므로 파라미터 k_2 는 공급함수모형에서의 균형점인 $k_2 = 14.52$ 의 일정한 값을 갖는다. 이 때의 G2 이득을 π_{sf2} 라 나타내며 이는 공급함수모형에서의 이득과 동일한 값을 갖는다.

반면 고가소량공급 전략에서는 $q_1 = q_{m1}$ 인 상태에서 G2의 이득극대화 전략을 선택하므로 최적대응함수는 다음과 같은 과정으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \partial \pi_2 / \partial k_2 &= \partial (pq_2 - b_2 q_2 - 0.5m_2 q_2^2) / \partial k_2 \quad (p = k_2 + m_2 q_2) \\ &= p' q_2 + p q_2' - (b_2 + m_2 q_2) q_2' \quad (p' = 1 + m_2 q_2') \quad (9) \\ &= q_2 + (k_2 - b_2 + m_2 q_2) q_2' = 0 \end{aligned}$$

여기서 q_2 는 수요 공급의 교점 조건인 $b_0 - m_0 (q_{m1} + q_2) = k_2 + m_2 q_2$ 조건으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$q_2 = (b_0 - k_2 - m_0 q_{m1}) / (m_0 + m_2) \quad (10)$$

이로부터 q_2' 을 계산하여 식(9)에 대입하면 $q_2 = (k_2 - b_2) / m_0$ 의 최적 조건이 구해지며 이를 식(10)과 연립하여 정리하면 다음과 같은 k_2 의 최적대응함수가 유도된다.

$$k_2 = (-m_0^2 q_{m1} + m_0 b_0 + m_0 b_2 + m_2 b_2) / (2m_0 + m_2) \quad (11)$$

고가소량전략에서의 이와 같은 유도결과를 대입한 G2의 이득은 용량제한 q_{m1} 의 함수가 되며 $\pi_{bd2}(q_{m1})$ 로 나타낸다.

따라서 G2는 $\pi_{bd2}(q_{m1}) > \pi_{sf2}$ 일 때는 고가소량전략으로 식(11)의 파라미터를 선택하고 $\pi_{bd2}(q_{m1}) \leq \pi_{sf2}$ 일 때는 저가대량전략으로 $k_2 = 14.52$ 를 선택한다. G1의 발전용량 q_{m1} 이 $\pi_{bd2}(q_{m1}) = \pi_{sf2}$ 조건을 만족할 때를 임계(critical) 용량이라 정의하며 이를 계산하면 $q_{m1}^c = 68.05$ 가 된다. 이러한 결과를 영역 II의 전략변수 공간에서 최적대응곡선으로 나타내면 다음 그림2와 같다.

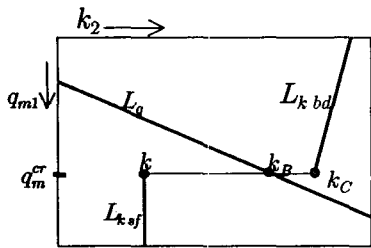


그림 2 영역 II에서의 최적대응곡선
Fig. 2 Best response curves in region II

여기서 직선 L_q 는 식(8)에 의해 계산된 q_{m1} 의 최적대응전략이고 q_{m1}^c 에서 불연속적으로 급변하는 곡선 L_k 는 k_2 의 최적대응전략이다. 선분 L_{ksf} 는 저가대량공급 전략에서 공급함수모형의 균형전략을 선택하는 부분이고 선분 L_{kbd} 는 고가소량공급 전략에서 식(11)의 최적대응전략을 나타낸다. 점선은 불연속 급변 부분으로서 그림2에서 3개의 특성점은 $k_A = 14.52$, $k_B = 22.55$, $k_C = 26.03$ 이다.

그림2에서 L_q 와 L_k 의 교점이 형성되지 않음을 알 수 있으나 이는 표1과 같은 조건에서의 상태로서 일반적인 경우라고 보기에는 아직 이르다. 앞 4.1절의 첫 번째 주장을 보이기 위한 수식전개를 시도하였으나 과도하게 복잡하게 나타나서 본 연구에서는 귀납적 방법을 택하였다. 즉, 표1에서의 값들을 난수적으로 변화시켜 각 경우마다 3개의 특성점(k_A , k_B , k_C)을 계산하여 $k_A/k_B < 1$ 조건과 $k_C/k_B > 1$ 의 조건을 만족하는지를 분석하였다. 분석결과는 다음 그림3과 같다.

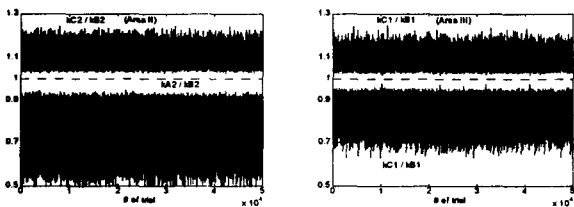


그림 3 영역 II와 III에서의 최적대응함수 교점 분석
Fig. 3 Intersection analysis in the region II and III

난수 발생에 의해 표1에서의 6개 값을 변화시켜 50000개 경우에 대해 영역 II와 III에서 최적대응곡선의 불연속 특성을 분석한 결과를 나타내었다. 두 영역에서 $k_A/k_B < 1$ 조건과 $k_C/k_B > 1$ 조건이 항상 만족됨을 알 수 있으며 따라서

최적대응곡선의 교점이 나타나지 않는다는 주장을 뒷받침한다.

4.3 지역 내쉬균형점 비교

전략공간에서 일부 영역만을 고려했을 때의 최적대응전략 교점이 반드시 전체 영역에서의 내쉬균형이라고는 할 수 없다. 하지만 일부 영역만을 고려했을 때 최적대응전략의 교점이 존재하지 않으면 그 영역에서는 광역 내쉬균형이 존재하지 않는다. 따라서 그림1과 같이 4개의 영역으로 구분했을 때 광역 내쉬균형은 영역 I 혹은 IV에서 나타날 것이다.

부분영역 I과 IV에서의 균형점이 이론적으로는 내쉬균형의 정의를 만족한다. 즉 Cournot 모형에 해당되는 영역 I의 균형상태에서 두 참여자는 입찰함수 파라미터를 바꿀 유인이 없으며 공급함수 모형에 해당되는 영역 IV의 균형상태에서 두 참여자는 발전가능용량을 바꿀 유인이 존재하지 않는다. 따라서 두 개의 단순전략 내쉬균형이 존재하게 된다.

이와 같이 2개 이상의 내쉬균형 상태가 존재할 때 그 중에서 어느 것이 실제 현상으로 나타날 것인가를 다루는 주제를 초점(focal point)[8]이라고 한다. 위험우위 등 여러 가지 측면에서 선택 기준이 제시되고 있지만 가장 설득력 있는 기준은 파레토(Pareto) 최적 개념이다. 게임 참여자 모두에게 가장 큰 이득을 주는 균형전략이 존재하면 그것을 파레토 최적이라 하며 참여자는 다른 균형상태 대신 파레토 최적을 선택한다는 것이다.

파레토 최적을 구하기 위해서는 기업이득의 대소를 비교해야 하는데 본 연구에서는 귀납적 방법으로 이득을 비교하였다. 앞의 4.3절에서와 같이 표1에서의 값들을 50000회 난수 발생시켜 영역 I과 IV에서의 균형상태를 구하고 이득 계산의 결과를 다음 그림으로 나타내었다.

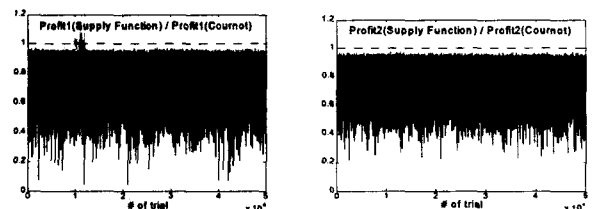


그림 4 영역 I과 IV에서의 기업이득 비교
Fig. 4 Profit comparison in the region I and IV

그림4는 영역 I에서의 이득(π_{co})과 영역 IV에서의 이득(π_{sf})을 비율(π_{sf} / π_{co})로 나타낸 것이다. 참여자 G1과 G2에 대해 계산한 결과, 50000개의 전체 사례에서 비율이 1보다 작음을 보인다. 따라서 $\pi_{co1} > \pi_{sf1}$, $\pi_{co2} > \pi_{sf2}$ 의 관계가 성립하며 파레토 최적 개념에서 앞 4.1절의 두 번째 주장이 검증된 것으로 볼 수 있다.

4.5 광역 내쉬균형점 검증

입찰전략 변수로서 발전가능용량과 입찰함수 파라미터를 동시에 고려하는 경우 게임의 내쉬균형은 발전가능용량만을 사용하는 것으로 나타난다. 또한 발전용량제한이 전략변수로 사용될 때 이는 Cournot 모형에서의 균형전략과 일치함을

주장하였다. 다음은 4.1절의 사례에 대한 Cournot 균형전략이 두 종류의 전략변수를 동시에 고려하는 경우의 내쉬균형 정의에 부합하는지 확인해 본다.

Cournot 균형전략인 $q_{co1}=53.1$, $q_{co2}=47.2$ 상태에서 각 참여자가 발전용량이나 입찰함수를 변경할 유인이 존재하는지 다음 그림5를 통해 살펴본다.

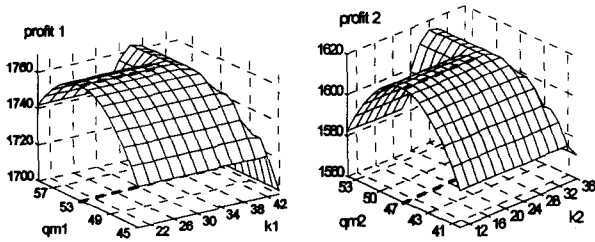


그림 5 광역 내쉬균형에서 G1과 G2의 이득분포
Fig. 5 Profit distributions of G1 and G2 at a NE

보수행렬을 나타내기 위하여 편의상 발전용량은 1MW 단위로, 파라미터는 2 단위로 이산화하였다. G1의 이득분포를 보면 $q_{co1}=53$ 을 선택하고 k_1 은 20~34 사이의 값을 선택하는 것이 이득 극대화 전략임을 알 수 있다. 파라미터를 그 이상으로 선택하면 입찰결과 공급량이 감소하고 이득도 감소하게 된다. 따라서 G1은 자신의 실제 입찰함수인 $k_1=20$ 을 변경시킬 이유가 없으며 발전가능용량도 Cournot NE를 이탈할 이유가 없다. 또한 G2의 경우에도 $q_{co2}=47$ 을 선택하고 k_2 는 실제 입찰함수인 10을 선택하게 되어 Cournot NE가 전체 내쉬균형전략의 정의에 부합됨을 알 수 있다.

5. 결 론

국내 전력도매시장에 사용될 전력시장 운영규칙이 제정됨으로서 시장운영에 대한 틀이 마련되었다. 발전 사업자의 과도한 전략적 입찰을 방지하기 위해 평가위원회 등의 장치를 마련하고는 있으나 참여자의 전략이 개입될 여지는 여전히 존재한다. 본 연구는 이러한 현상을 게임이론 측면에서 분석하였다.

입찰 참여자의 전략변수로서 발전가능 용량제약과 입찰함수를 전략적으로 조정하는 파라미터로 구분하여 고찰하였다. 발전가능용량만을 사용하는 게임의 경우에 Cournot 모형에서의 동일한 내쉬균형이 나타남을 확인하였다. 또한 두 종류의 전략변수를 동시에 고려하는 경우, 4개의 부분 영역에서의 균형점을 분석함으로써 광역 내쉬균형이 Cournot 모형에서의 균형과 동일함을 알게 되었다.

부분영역 중에서 발전용량과 파라미터가 사용되는 경우, 최적대용곡선의 교점이 존재하지 않는다는 사실을 보였으며 Cournot 내쉬균형과 공급함수 모형의 내쉬균형을 비교함으로써 Cournot 내쉬균형이 발전기업에게 더 큰 이득이 됨을 알게 되었다. 이러한 사실을 통해, 국내 전력도매시장에서 발전사업자들은 입찰함수는 한계비용함수를 그대로 유지하면서 발전가능용량을 전략적으로 선택하리라는 예상을 할 수가 있다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전력거래소, 전력시장운영규칙, <http://www.kpx.or.kr> 2003. 11.
- [2] 신영균, 김발호, 전영환, "Uniform Pricing 하에서의 지역적 시장지배력과 완화방안으로서의 Bid Cap," 전기학회 논문지, 52A권 10호 pp. 610-616, 2003. 10.
- [3] 김진호, 박종배, 박종근, "발전기 최대용량 제약이 현물시장의 내쉬균형에 미치는 영향에 대한 해석적 분석," 전기학회논문지, 52A권 6호 pp. 340-346, 2003. 6.
- [4] 이광호, "전력시장 과점구조에서의 발전기 기동정지 게임 해석," 전기학회논문지 52A권 11호 pp. 668-674, 2003. 11.
- [5] D. Chattopadhyay, R. Ramanathan, "A New Approach to Evaluate Generation Capacity Bids," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.13, No.4, pp.1232-1237, November 1998.
- [6] G. B. Shrestha, S. Kai, and L. Goel, "Strategic Bidding for Minimum Power Output in the Competitive Power Market," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.16, No.4, pp.813-818, November 2001.
- [7] 이광호, "송전선 제약조건에 따른 전력거래에서의 시장지배력 연구," 전기학회논문지, 51A권 8호 pp. 403-408, 2002. 8.
- [8] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*, The MIT Press, 1991.

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(공학박). 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