

# 송전선 제약조건에 따른 전력거래에서의 시장지배력 연구

論 文

51A-8-6

## Analysis on Market Power in Power Transaction with Transmission Constraints

李 光 浩\*  
(Kwang-Ho Lee)

**Abstract**—As the electricity industry undergoes a process of fundamental restructuring, horizontal market power appears as a potential obstacle to a fully competitive wholesale electricity market. Market power is the ability profitably to maintain prices above competitive levels by restricting output below competitive levels. In models for imperfect competition under the consideration of the transmission constraints, the Nash equilibrium has the form of a mixed strategy. In this paper, the models for analyzing imperfect competition are compared using the solution of pure and mixed equilibria. The relation between market power and the capacity of a transmission line is investigated by imperfect competition analysis methods: Cournot, Bertrand, and Supply Curve model.

**Key Words** : Market Power, Nash Equilibrium, Mixed Strategy, Cournot, Bertrand, Supply Curve Competition, Lemke Algorithm, Transmission Constraints

### 1. 서 론

전통적으로 전력은 일반 상품과는 달리 제품의 차별성이 두드러지지 않았다. 하지만 위치와 시간에 따라서 그 가치를 달리 하려는 작업이 현재 많은 나라에서 진행중이다. 발전공급자의 경쟁을 유발시켜 발전비용의 감소와 가격의 인하를 유도하는 것이 주된 목적이다.

전력산업의 구조를 수직통합형에서 수평분산형으로 바꾸는 것이 외형적인 변화라면 거래가격과 발전량의 결정 메커니즘을 설계하는 것은 이러한 변화의 성공여부를 결정짓는 내용면에서의 핵심이라 할 수 있다. 전력산업의 특성상 무한히 많은 기업의 참여를 가정할 수가 없으므로 전력시장에서는 과점(Oligopoly) 형태의 불완전 경쟁이 나타난다[1],[2]. 따라서 거래가격과 발전량이 시장원리에 의해 결정되지 않고 일부 기업의 이익에 치우쳐 왜곡되는 현상을 분석 감시하고 이를 방지하는 시장구조의 보완이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 전력거래 시장에서 기업의 거래전략, 가격결정구조 등의 해석을 통한 시장지배력(Market Power) 분석이 매우 중요하다[1],[3].

시장지배력이란 발전기업이 기업이익을 목적으로 시장가격과 공급량의 결정에 영향력을 행사하는 가능성을 의미한다. 경제학에서 사용하는 시장지배력의 기준은 시장점유율(Market Share)이다. 시장점유율을 정의한 HHI (Hirschman-Herfindahl Index) 지수[4]가 일정 비율을 초과할 때 시장원리가 왜곡될 수 있다고 보는 것이다. HHI 지수를 전력계통에 적용한 시도[5]가 있지만 전력시장에서의 시장지배력은 HHI

지수로 해석하기에는 매우 다른 특성을 갖는다[1].

전력산업의 구조가 개방경쟁형으로 전환되어 수평적 분산 구조를 갖게됨에 따라 시장점유율에 의한 시장지배의 가능성이 낮아진 반면 계통구조와 조건에 따라 전력거래가 제한을 받는 상황에서 가격결정이 왜곡될 가능성은 높아진다. 발전공급자는 의도적으로 제한적 상황을 유도함으로써 경쟁상태에서보다 높은 이익을 얻을 수 있기 때문이다. 따라서 전력시장에서의 시장지배력은 계통특성에 매우 의존적인 전략에 의해 나타나므로[3] 거래의 균형, 계통의 특성, 기업의 전략 등에 대한 해석이 필요하다.

본 연구에서는 불완전 경쟁 모형인 Cournot 모형, Bertrand 모형, 공급곡선 모형을 사용하여 수요와 공급의 균형을 해석하고 그에 따른 시장지배력을 분석하였다. 송전선 제약조건을 고려함에 따라 전략변수 공간에서 불연속성이 발생하고 이로 인해 내쉬 균형은 복합전략(Mixed Strategy)으로 나타날 수가 있다[6]. 기존의 Cournot 모형을 사용한 연구[3],[6]와 공급곡선 모형에 대한 연구[2],[7],[8]에서는 복합전략(Mixed Strategy)을 고려하지 않아 송전선 제약조건과 같은 시장지배력에 중요한 영향을 미치는 요인을 고려하지 못하였다. 본 연구에서는 복합균형점을 계산함으로써 Bertrand 모형의 적용이 가능하고 시장지배력 분석에 대한 각 방법들의 결과를 종합함으로써 송전선 제약조건과 시장지배력간의 보다 정확한 관계를 해석할 수가 있다.

### 2. 내쉬 균형점에서의 시장지배력

기존의 수직통합형 전력산업 구조에서는 부하의 예측과 발전기의 비용 특성을 종합하여 전체 비용을 최소화하는 급전계획이 이루어져왔다. 이는 경제학적 산업구조의 분류에 의하면 완전경쟁형 모형에 가깝다. 기존 급전계획에서는 부하

\* 正 會 員 : 檀國大 電氣電子컴퓨터工學部 副教授 · 工博  
接受日字 : 2002年 3月 28日  
最終完了 : 2002年 6月 25日

의 가격탄력성을 영으로 간주하지만 완전경쟁 모형에서는 부하를 가격탄력성을 갖는 수요곡선으로 고려한다.

전력산업이 개방경쟁 형태로 전환되면 전력의 수요는 발전업자 혹은 중개업자에 의해 가격탄력성을 갖게 되고 공급 특성은 기존의 비용함수가 아닌 수익극대화 전략에 의해 결정된다. 기업간의 수익극대화 전략에 의해 경쟁이 이루어지는 경우를 불완전경쟁이라 하며, 불완전 경쟁에서 거래의 균형을 해석하는 방법으로 대표적인 것이 Cournot 경쟁, Bertrand 가격경쟁, 공급곡선 경쟁 등이 있으며 해석 방법의 차이에 따라 내쉬 균형점도 다르게 나타난다.

본 연구에서는 공급참여 기업 2개, 수요참여 기업 1개의 시장형태를 다룬다. 이는 전력거래 해석 사례에서 많이 사용하고 있는 시장구조이다[2],[3],[6],[7].

### 2.1 완전경쟁(Perfect Competition)

완전경쟁에서는 수요의 이익(Benefit)을 최대화, 공급의 비용을 최소화하는 가격에서 균형을 이룬다. 그림1에서 면적 B는 수요의 이익, 면적 C1과 C2는 공급비용을 나타내며 B(p)-C1(p)-C2(p)를 최소로 하는 가격이 완전경쟁에서의 시장가격이 된다.

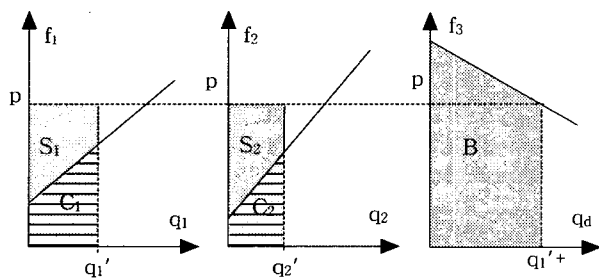


그림 1 수요-공급 균형점의 이득과 비용  
Fig. 1 Profit and cost at supply-demand equilibrium

두 공급참여자를 각각 N1과 N2, 수요를 N3라고, 시장현물가격을 p, 참여자의 발전량과 수요량을 각각 q1, q2, q3(=q1+q2)라 하고, 한계비용함수를 각각 f1(q1)=b1+m1\*q1, f2(q2)=b2+m2\*q2, 수요함수를 f3(q3)=b3-m3\*(q3)로 둔다. 그림1에서 면적 S1은 N1의 이득, S2는 N2의 이득이다.

제약조건이 없는 경우 완전경쟁의 균형은 각 참여자의 한계비용이 같을 때 나타난다. 따라서 완전경쟁의 균형점은 식(1)과 같이 유도된다.

$$\begin{pmatrix} q_1^* \\ q_2^* \\ p^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -m_1 & 0 & 1 \\ 0 & -m_2 & 1 \\ m_3 & m_3 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

공급과 수요곡선에서의 계수를 m1=0.25, m2=0.45, m3=0.5, b1=10, b2=5, b3=100 라 하면 균형점에서 q1=82.16, q2=56.76, p=30.54이며 공급자의 이득 S1과 S2는 각각 844, 725이고 수요의 잉여(surplus) S3는 4375이다. 수요의 잉여란 공급자에서의 이득과 같은 의미로서 그림1의 면적 B에서 지불액(=p\*q3)을 뺀 나머지로 계산된다. 이러한 이득의 수치는 거래의 균형해석 기법이 달라질 때 혹은 시장지배력이 작용할 때

를 비교하는 중요한 기준이 된다.

### 2.2 Cournot 모형

과점형태의 불완전 경쟁에서 공급자는 기업의 이득을 최대로 하는 전략으로 시장에 참여한다. Cournot 모형에서는 공급자가 공급량을 결정하고 시장운영자가 계통의 제약조건과 목적(사회적 이득 등)을 고려하여 가격을 결정한다. 제약조건을 고려하지 않는다면 가격은 수요곡선에 의해 결정된다.

N1은 N2의 공급량 q2를 파라미터로 하여 N1의 이득(면적 S1)을 최대로 하는 q1을 선택하고 N2는 반대로 q1을 파라미터로 하여 면적 S2를 최대로 하는 q2를 선택한다. 따라서 이러한 균형점은 목적함수가 서로 다른 두 개의 최적화 문제를 동시에 계산함으로써 구해진다. 또한 균형점에서는 상대방의 공급량이 변하지 않는다는 가정하에 최대의 이득을 얻게되며 이를 내쉬 균형이라 한다[4],[9].

제약조건을 고려하지 않을 때, S1이 최대가 되는 조건을 구하면 q1과 q2의 선형식이 유도되고 S2의 최대조건 또한 q1과 q2의 선형식이 유도된다. 이 두 식을 동시에 만족하는 q1과 q2는 식(2)와 같이 유도된다.

$$\begin{pmatrix} q_1^* \\ q_2^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2m_3 + m_1 & m_3 \\ m_3 & 2m_3 + m_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_3 - b_1 \\ b_3 - b_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

수요-공급곡선의 계수를 2.1절에서와 같이 적용하여 계산하면 q1=53.1, q2=47.2이고 시장가격은 p=49.8로서 각 발전기의 한계비용 23.3, 26.4보다 높다. 이는 공급자의 이득최대화 전략에 의한 결과이며 이때의 공급자 이득은 S1=1764, S2=1615로서 완전경쟁에서의 이득보다 2배 이상 큰 값이다. 반면 수요의 잉여는 S3=2516로서 크게 감소한다.

발전기업의 이득과 수요의 잉여를 합한 사회적 이득(Social Welfare)은 완전경쟁과 큰 차이가 없다. 따라서 사회적 이득이 발전기업에게 유리하게 재배분된 것으로 해석된다. 이와 같이 완전경쟁에 비해 높은 가격으로 적은 발전량을 공급하는 경우이므로 시장지배력(Market Power)이 작용하는 것으로 볼 수 있다. 전력시장에서의 시장지배력이란 “경쟁에 의한 가격보다 높은 가격으로 경쟁에 의한 발전량보다 낮은 발전량의 공급을 유지할 수 있는 능력”으로 정의된다[3]. 한편 불완전 경쟁의 해석모형 중에서 Cournot 내쉬 균형이 가장 공급자에게 유리하고 수요자에게 불리한 모형으로 알려져 있다[1]. 송전선 한계용량을 고려할 때 시장지배력이 어떻게 그리고 얼마나 작용하는지에 대해서 3절과 4절에서 소개한다.

### 2.3 Bertrand 모형

Bertrand 모형은 거래가격이 결정되는 작용에 대한 관점에서 해석한 방법으로서 Bertrand 가격경쟁 모형이라고도 한다. 기본적 원리는 가격에 의해서만 공급량이 결정된다는 것이다. 따라서 낮은 가격의 발전기가 전체 수요를 담당하고 경쟁을 통해 기업의 이득이 영이 될 때까지 가격이 하락한다[4]. 하지만 발전량은 한계비용이나 발전용량에 의해 제한을 받게 되므로 가격경쟁은 복잡한 양상을 보인다.

N1과 N2의 입찰가격을 각각 p1, p2라 할 때, p1 < p2이면 N1이 공급을 주도하여 한계비용이 p1과 같아지는 점에서 q1

표 1 입찰가격에 따른 발전력 결정

Table 1 Determination of Quantities according to Bid Price

	공급주도	N1의 발전량(q1)	N2의 발전량(q2)
p1 < p2	N1	q1 = min{q1max, d1(p1), d3(p1)}	q2 = $\begin{cases} 0 & \text{if } R2 = d3(p2) - q1 \leq q2min \\ R2 & \text{if } q2min < R2 < q2max \\ q2max & \text{otherwise} \end{cases}$
p2 ≤ p1	N2	q1 = $\begin{cases} 0 & \text{if } R1 = d3(p1) - q2 \leq q1min \\ R1 & \text{if } q1min < R1 < q1max \\ q1max & \text{otherwise} \end{cases}$	q2 = min{q2max, d2(p2), d3(p2)}

이 결정되고 잔여(Residual) 수요곡선에 의해 q2가 결정된다. p1 > p2이면 N2가 공급을 주도하고 q1은 잔여수요곡선으로부터 정해진다. p1 = p2일 때는 송전거리를 고려하여 N2가 주도하는 것으로 해석하였다. 입찰가격에 대해서 공급량의 결정은 발전량 조건과 계통조건을 고려하여 시장운영자에 의해 이루어진다. 다음 표1은 이러한 입찰가격과 공급량 결정의 관계를 나타낸 것이다.

표1에서 d1, d2, d3는 각각 공급함수 f1, f2, 수요함수 f3의 역함수로서 가격에 대한 발전량 혹은 수요량의 함수이다. 일례로 d3(p2) = (b3 - p2) / m3이고 R2 = (d3(p2) - q1)는 q1의 공급을 제외한 잔여수요에 대해 N2가 p2의 가격으로 공급하는 발전량이 되고 R1은 잔여수요에 대한 N1의 공급량이 된다. 또한 q1max, q1min, q2max, q2min은 각각 N1과 N2의 최대발전량과 최소발전량이다.

이와 같이 입찰가격과 발전량 조건에 따라 발전량이 불연속적으로 정해지고 이득함수 또한 불연속적으로 나타난다. 따라서 해석적 방법으로 내쉬 균형점을 계산하기는 어렵다. 본 연구에서 이득행렬과 Lemke 알고리즘[10]을 이용하여 계산한 결과, 내쉬 균형점에서의 가격전략은 그림2와 같이 확률 분포를 갖는 복합전략(Mixed Strategy)으로 나타난다.

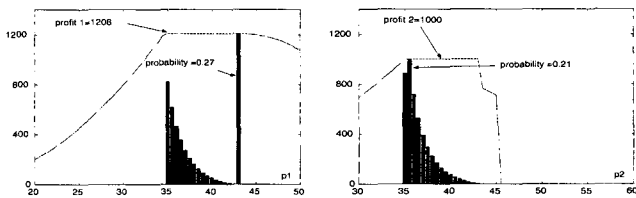


그림 2 Bertrand 내쉬 균형점의 복합전략 분포  
Fig. 2 Mixed Strategy Distribution of Bertrand Equilibrium

내쉬 균형은 0.5 간격으로 가격입찰을 하는 경우, 그림2와 같이 N1과 N2 모두 35~43.5 사이에서 확률분포를 가지며 최대확률은 p1=0.27, p2=0.21로 나타난다. 함께 표시한 기대이득곡선은 상대방이 그림과 같은 복합전략을 선택할 때 자신의 가격전략에 따른 기대이득을 의미한다. 기대이득곡선이 그림2와 같이 영이 아닌 확률분포를 갖는 영역에서 균일한 최대이득을 나타내므로 각 기업은 전략을 수정해서 더 많은 이득을 얻을 수는 없다. 따라서 그림과 같은 복합전략이 내쉬 균형인 것이다.

가격전략이 확률분포를 갖기 때문에 공급량 또한 확률분포를 갖는다. 따라서 공급량은 기대값으로 표시할 수가 있으며 q1=64.7, q2=57.7으로 계산된다. 기대가격은 p1=38.2, p2=36.5이고 기대이득은 S1=1208, S2=1000으로서 완전경쟁과 Cournot 경쟁의 사이에 속하는 값이다. 이 결과에서도 완전

경쟁에 비해 높은 가격으로 대체로 적은 양을 공급함으로써 기업이 높은 이득을 취하게 된다. 따라서 시장지배력이 작용한 것으로 해석된다.

2.4 공급곡선(Supply Curve) 경쟁 모형

한계비용과 무관하게 전략적인 공급곡선으로 입찰함으로써 가격경쟁과 발전량 경쟁의 특성을 혼합한 모형이다. Cournot 모형에 비해서 해석이 복잡하기는 하지만 부하특성에 불확실성이 많을 때, 그리고 현물시장(Spot Market)에서의 전략을 분석하는 데에 공급곡선 모형이 유리한 면도 있다[1].

거래의 결정은 제시된 공급곡선을 한계비용곡선으로 간주하여 완전경쟁 개념에 의해 수요의 잉여를 최대화하고 전략적 비용을 최소화 하는 점에서 이루어진다. 입찰시의 공급곡선 형태에 대해서는 여러 가지 연구가 시도되고 있다 [2],[7],[8]. 본 연구에서는 선형비용함수를 가정하고, 입찰은 일차함수의 기울기를 고정하고 절편을 변경하는 형태로 정의하였다. 즉 입찰공급함수를 g1, g2라 할 때 g1(q1) = k1 + m1 \* q1, g2(q2) = k2 + m2 \* q2로 정의했으며, 발전기업은 절편 파라미터 k1과 k2를 결정하여 이득을 극대화하는 방식이다.

완전경쟁에서는 한계비용함수 f1과 f2에 의해 가격도 결정되고 기업의 이득도 계산되지만, 공급곡선경쟁 모형에서는 가격결정은 g1과 g2에 의해 결정되고 이득은 f1과 f2에 의해 정해진다. 따라서 발전기업은 높은 가격을 유도하기 위해서 k1과 k2를 증가시키려 할 것이다. 하지만 수요곡선에 의한 수요량이 감소하게 되어 적절한 균형점으로 수렴하게 된다.

제약조건이 없는 경우 제시된 입찰함수에 대해 동일한 가격에서 발전량이 결정되므로 식(3)과 같은 입찰 파라미터와 공급량의 선형관계가 유도된다.

$$\begin{pmatrix} q_1^* \\ q_2^* \end{pmatrix} = \frac{-1}{\Delta} \begin{pmatrix} m_2 + m_3 & -m_3 \\ -m_3 & m_1 + m_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} + \frac{b_3}{\Delta} \begin{pmatrix} m_2 \\ m_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서  $\Delta = m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1$ .

한편 N1의 이득 최대화 문제를 나타내면 식(4)와 같다.

$$\max_{k_1} J_1(k_1) = q_1 k_1 + 0.5 m_1 q_1^2 - b_1 q_1 \quad (4)$$

최적조건식  $\partial J_1 / \partial k_1 = (k_1 + m_1 q_1^* - b_1) \partial q_1^* / \partial k_1 + q_1^* = 0$  에서 q1과 미분항을 식(3)에서 대입하면 k1과 k2의 관계식이 유도되고 N2의 최적조건식으로 유도한 또 하나의 k1과 k2의 관계식으로부터 식(5)와 같은 내쉬 균형점에서의 입찰 파라미터가 구해진다.

$$\begin{pmatrix} k_1^* \\ k_2^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (m_2 + m_3)(\Delta + m_2 m_3) & -m_2 m_3^2 \\ -m_1 m_3^2 & (m_1 + m_3)(\Delta + m_1 m_3) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta(m_2 + m_3)b_1 + m_2^2 m_3 b_3 \\ \Delta(m_1 + m_3)b_2 + m_1^2 m_3 b_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서의  $\Delta$ 는 식(3)에서와 같다.

식(5)에 의한 입찰 파라미터는  $k_1=24.73$ ,  $k_2=14.54$ , 시장가격은 40.29, 발전량은  $q_1=62.21$ ,  $q_2=57.22$ , 이득은  $S_1=1400$ ,  $S_2=1282$ 이다. N1과 N2의 이득은 모두 Bertrand 내쉬 균형과 Cournot 내쉬 균형의 사이의 값이다. 여기에서도 완전경쟁에 비해서 높은 가격과 대체로 낮은 발전량을 공급함으로써 경쟁수준 이상의 기업 이득이 나타나므로 시장지배력이 나타난다.

그림3은 식(5)에 의해 계산된  $k_1$ 과  $k_2$ 의 값이 내쉬 균형을 보여준다.

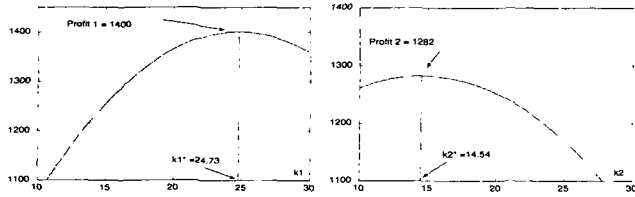


그림 3 공급곡선경쟁에서의 내쉬 균형 전략과 이득분포  
Fig. 3 Nash Equilibrium Strategy and Profit of Supply Function Competition

N2가  $k_2=14.54$ 를 선택했을 때 N1이  $k_1=10\sim 30$ 을 선택함에 따른 이득분포를 보면  $k_1=24.73$ 에서 최대를 나타내고, 반대로 N1이  $k_1=24.73$ 을 선택했을 때는  $k_2=14.54$ 에서 최대이득을 나타낸다. 따라서 내쉬 균형의 정의와 일치한다.

### 3. 제약조건이 고려된 게임의 균형

#### 3.1 제약조건에서의 완전경쟁

제약조건이 내쉬 균형에 미치는 영향은 간단한 문제가 아니다. 제약조건 종류, 계통의 토폴로지, 계통정수, 부하 특성 등에 따라서 복잡하게 나타난다. 본 연구에서는 그림4와 같이 2개의 발전기업과 한 개의 집중부하 사이의 전력거래 모형, 그리고 송전선 한계용량이 작용할 때의 내쉬 균형을 살펴본다.

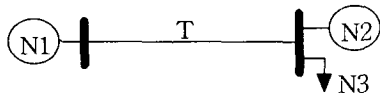


그림 4 송전선 한계용량의 사례계통  
Fig. 4 Sample System for Transmission Capacity

그림4에서의 계통해석은 DC 조류계산법을 사용하며 송전선 한계용량  $T_m$ 에 의해 N1의 발전량  $q_1$ 은  $T_m$ 을 초과하지 못한다. 제약조건이 없는 완전경쟁에서 균형점은 한계비용과 시장가격이 같을 때이고 식(1)과 같다. 하지만  $q_1$ 이 송전선 한계용량  $T_m$ 을 초과하면 제약조건 만족을 위해 균형점은 식(6)으로 정리된다.

$$q_1^* = T_m, \quad q_2^* = (b_3 - m_3 T_m - b_2) / (m_2 + m_3) \quad (6)$$

따라서  $T_m$ 이 82.16 보다 클 때는 식(1)에 의해, 82.16 보다 작을 때는 식(6)에 의해 균형점이 계산된다.

#### 3.2 제약조건에서의 Cournot 모형

발전량  $q_1$ 이  $T_m$ 을 초과할 때는  $q_1=T_m$ 으로 고정되고, N1와 N2의 가격은  $p_1=f_1(T_m)$ ,  $p_2=f_3(T_m+q_2)$ 로 정해진다. 따라서  $q_1$ 과  $T_m$  크기에 따라  $q_1$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ 는 불연속적으로 변하게 되고 이득함수 또한 불연속적으로 나타난다.

제약조건이 없는 경우는 이득함수의 미분을 통해서 식(2)의 Cournot 내쉬 균형점이 유도되지만 제약조건을 고려하면 각 참여자는 불연속 이득함수의 최적화를 계산해야 한다. 본 연구에서는  $q_1$ 과  $q_2$ 를 1MW 단위로 이산화(discretize)하여 이득함수를 이득행렬로 변환한 후, Lemke 알고리즘을 적용하여 내쉬 균형점을 구했다. 이득함수가 불연속인 경우에 내쉬 균형이 복합전략(Mixed Strategy)으로 나타날 수 있으나 [6], 사례계통의 경우에는 단순전략(Pure Strategy)으로 나타난다. 이는 제약조건이 발전량 조건으로 간단히 변환되기 때문으로 해석된다.

내쉬 균형의 일례로  $T_m=50$ 인 경우에  $q_1=49$ ,  $q_2=49$ 으로 계산된다.  $q_1$ 이 50이 되면 가격이 한계비용 가격으로 감소하므로 N1은  $T_m$ 보다 한 단위 작은  $q_1=49$ 를 선택할 것이고, 이에 대해서 N2는 잔여수요곡선  $f_3'(q_2)=b_3-m_3(T_m+q_2)$ 에 대한 독점(Monopoly) 형태의 선택을 할 수가 있다. 독점형태에서의 최대이득은 한계수익(Marginal Revenue)과 한계비용이 같을 때 [4]이므로 이 조건에 의해서  $q_2=(b_3-m_3 T_m-b_2)/(m_2+2*m_3)$  일 때 최대이득을 얻게 된다. 최적의  $q_2$ 를 계산하면 48.62이지만 1MW 단위로 이산화했기 때문에 시뮬레이션 결과는 49로 나타난다.

#### 3.3 제약조건에서의 Bertrand 모형

가격으로 경쟁할 때 각 발전기의 한계비용과 발전용량에 따라서 발전량이 결정되는 관계를 표1에서 설명하였다. 선로용량 제약조건을 반영하면 표1에서 N1이 주도하는 경우의 발전량  $q_1$ 은  $T_m$ 이 추가되어  $q_1=\min(q_1\max, d_1(p_1), d_3(p_1), T_m)$ 에 의해 결정되고 N2가 주도하는 경우의 발전량  $q_1$ 은 다음 관계에 의해 결정된다.

$$q_1 = \begin{cases} 0 & \text{if } R_1 = d_3(p_1) - q_2 \leq q_1\min \\ R_1 & \text{if } q_1\min < R_1 < \min(T_m, q_1\max) \\ \min(T_m, q_1\max) & \text{otherwise} \end{cases}$$

제약조건이 고려되는 경우 이득함수는 더욱 복잡한 불연속 구간을 갖게 되어 입찰가격을 0.5 단위로 이산화한 후 Lemke 알고리즘으로 내쉬 균형점을 계산하였다. 제약조건이  $T_m=60$ 일 때의 내쉬 균형점 예를 보면 그림5와 같다.

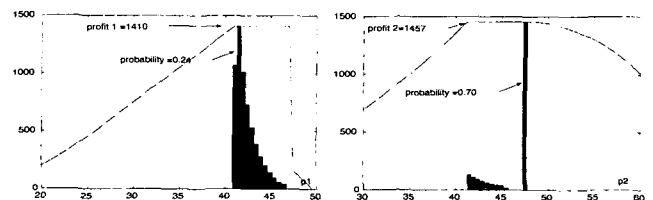


그림 5 송전선 제약조건이 고려된 Bertrand 균형점  
Fig. 5 Mixed Strategy of Bertrand Equilibrium with Transmission Constraints

제약조건을 갖지 않는 경우의 그림2에 비해서 확률분포가 우측으로 이동했음을 알 수 있다. 확률분포에 대한 기대가격을 계산하면  $p_1=42.3$ ,  $p_2=46.1$ 이고 공급량의 기대값은  $q_1=56.4$ ,  $q_2=51.1$ , 기대이익은  $S_1=1410$ ,  $S_2=1457$ 이다. 따라서 송전선 제약조건이 없을 때의 균형점인 2.3절의 결과와 비교하면 N1과 N2 모두 발전량을 줄이고 가격을 높여서 이익을 증가시킨 것을 알 수 있다. 이는 송전선 제약조건을 이용하여 시장지배력이 더욱 심하게 작용한 것으로 볼 수 있다.

### 3.4 제약조건에서의 공급곡선 경쟁 모형

입찰 파라미터  $k_1$ 과  $k_2$ 에 대해서  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $f_3$ 의 가격이 같아지는 점에서 거래가 결정되고 이때의 발전량은 식(3)과 같다. 만약 발전량  $q_1$ 이  $T_m$  보다 크면  $q_1=T_m$ 으로 고정되고 잔여수요곡선  $f_3'(q_2) = b_3 - m_3(q_2 + T_m)$ 과 N2의 입찰함수  $g_2$ 의 교점에서  $q_2$ 와  $p_2$ 가 결정된다. 따라서 N2의 발전량과 현물가격은  $q_2 = (b_3 - m_3 T_m - b_2) / (m_2 + m_3)$ ,  $p_2 = g_2(q_2)$ 이고 N1의 가격은  $p_1 = g_1(T_m)$ 이다.

이와 같이 파라미터  $k_1$ 과  $k_2$ 에 따라서 이익함수는 불연속으로 나타나므로 파라미터  $k_1$ 과  $k_2$ 를 0.5 간격으로 이산화하고 Lemke 알고리즘으로 균형점을 구할 수 있다. 제약조건이  $T_m=60$ 일 때의 예를 보면 그림6과 같다.

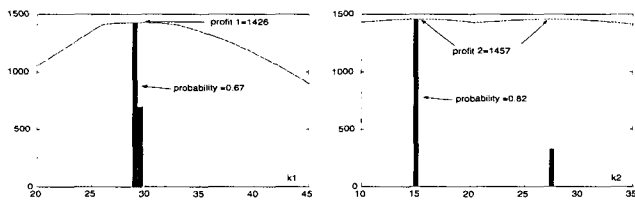


그림 6 송전선 제약조건이 고려된 공급곡선경쟁 균형점  
Fig. 6 Mixed Strategy of Supply Curve Equilibrium with Transmission Constraints

제약조건이 없는 경우에는 그림3과 같이 단순전략이 계산되지만 제약조건이 고려되면서 그림6의 복합전략이 나타난다. 입찰 파라미터는 N1, N2 모두 증가하고, 확률분포에 대한 기대가격을 계산하면  $p_1=42.9$ ,  $p_2=43.5$ 이고 공급량의 기대값은  $q_1=54.8$ ,  $q_2=58.2$ , 기대이익은  $S_1=1458$ ,  $S_2=1457$ 이다. 따라서 송전선 제약조건이 없을 때와 비교하면 발전량을 줄이거나 비슷하게 유지하면서 가격을 높여서 이익을 증가시킨 것을 알 수 있다. 역시 송전선 제약조건을 이용하여 시장지배력을 행사한 것으로 분석된다.

### 4. 제약조건과 시장지배력의 관계

제약조건이 고려된 내쉬 균형에 대해서 3장에서 분석하였듯이 발전기업은 발전량을 유지하거나 낮추면서도 가격을 상승시켜 높은 이익을 얻을 수 있었다. 또한 거래균형의 해석 방법에 따라서 제약조건에 따른 전략이 다르게 나타났다. 본 연구에서는 제약조건이 없는 상황에서 송전선로 한계용량을 40까지 감소시키면서 각 방법에 따른 내쉬 균형을 계산하고 분석하였다. 그림7은 제약조건이 심화됨에 따른 N1과 N2의 이익과 수요 N3의 잉여(surplus)를 완전경쟁, Bertrand, 공급곡선, Cournot 모형 등 4가지 방법으로 계산한 것이다.

송전선 용량이 90 이상일 때는 제약조건이 없는 경우와 동일한 결과를 보인다. 이 구간에서의 각 방법에 따른 이익을 비교하면 전력공급자에게는 'Cournot-공급곡선-Bertrand-완전경쟁'의 순서로 높은 이익이 나타나고 전력사용자에게는 반대의 순서로 높은 이익이 나타난다.

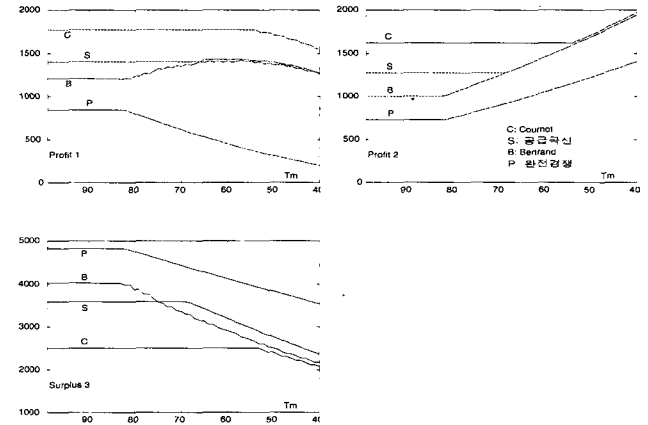


그림 7 송전선용량 변화에 따른 이익 변화  
Fig. 7 Profits Changes with Decreasing Transmission Capacity

그림7에서의 송전용량이 작아질수록 N2의 이익이 선형적으로 증가하고 부하 N3의 잉여는 감소한다. N1의 이익은 완전경쟁일 때 지속적으로 감소하는 반면 불완전경쟁의 세가지 방법에서는 송전선 제약에 대해 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 따라서 송전선 제약이 심화될수록 전체 공급자 이익의 합은 증가하고 사용자의 잉여는 감소하게 된다. 공급자 이익의 합이 대체로 일정한 값을 유지하는 완전경쟁의 경우와 비교할 때 공급자의 시장지배력이 작용하였고 송전선 제약이 심화될수록 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

N2의 이익변화를 보면 70 이후에는 공급곡선 모형과 Bertrand 모형이 일치하고 55 이후에는 Cournot 모형과도 비슷해진다. N1의 이익변화에서는 65 이후에 공급곡선 모형과 Bertrand 모형이 비슷한 추이를 나타낸다. 가격과 발전량이 서로 다름에도 불구하고 제약조건이 심화될수록 이들 모형이 서로 비슷한 값을 갖는 점은 매우 흥미로운 결과이다.

각 방법의 내쉬 균형에서 제약조건 변화에 따른 발전량의 추이는 그림8, 거래가격의 추이는 그림9와 같다.

그림8과 그림9에서 내쉬 균형이 복합전략으로 나타나는 경우의 발전량과 거래가격은 복합전략의 확률분포를 이용하여 기대값으로 계산하였다. N1의 경우, 완전경쟁에서 발전량과 가격이 모두 감소하는 반면 불완전 경쟁에서는 발전량을 줄이면서 가격을 상승시켜 송전용량의 감소에도 불구하고 이익의 감소는 크게 나타나지 않는다. 발전량은 경쟁상태 수준으로 유지하면서 가격을 경쟁상태 이상으로 유지시키는 상황이므로 시장지배력의 작용한 것으로 해석된다. N2의 경우, 완전경쟁에서는 가격의 낮은 상승과 발전량의 높은 상승을 보이는 반면 불완전경쟁에서는 발전량을 제한해서 가격의 높은 상승을 유도한 것으로 분석된다. 따라서 시장지배력이 작용하였으며 송전용량의 감소에 따라 더욱 강하게 나타남을 알 수 있다.

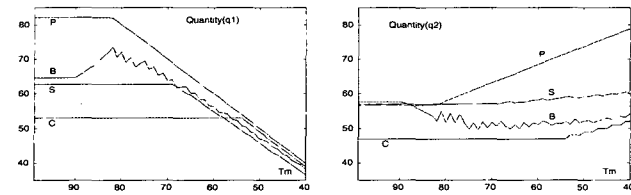


그림 8 송전선용량 변화에 따른 발전량 변화  
 Fig. 8 Quantity Changes with Decreasing Transmission Capacity

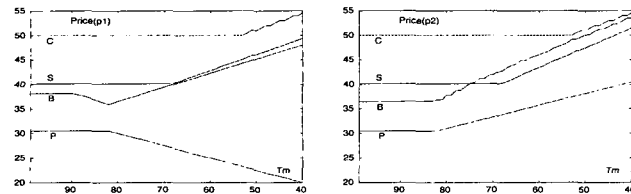


그림 9 송전선용량 변화에 따른 거래가격 변화  
 Fig. 9 Price Changes with Decreasing Transmission Capacity

5. 결 론

전력산업의 구조가 개방경쟁형으로 개편됨에 따라 시장지배력도 수직적인 의미에서 수평적인 의미로 전환된다. 수평적 의미의 시장지배력이란 위치와 계통조건에 따라 거래가격과 공급량을 조절하여 발전기업이 경쟁수준 이상의 이득을 취하는 것이다. 따라서 전력시장에서 거래가 형성되는 원리와 기업의 전략을 분석하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 불완전 경쟁에서 사용되는 거래해석 모형을 이용하여 내쉬 균형에 대해 분석하였으며 단순전략의 내쉬 균형 뿐만 아니라 확률분포를 갖는 복합전략에 대해서도 내쉬 균형점을 계산하였다. 따라서 송전선 한계용량과 같이 시장지배력에 크게 영향을 미치는 제약조건도 고려할 수가 있다.

세가지의 대표적인 불완전 경쟁 해석방법을 적용한 결과 모두가 시장지배력의 작용을 나타냈고 Cournot -공급곡선-Bertrand의 순서로 시장지배력이 크게 작용함을 알 수 있었다. 또한 송전선 한계용량이 작아질수록 시장지배력이 크게 작용하여 사회적 이득이 발전기업에 더욱 유리하게 재배분되는 현상도 확인되었다.

이와 같은 시장지배력의 분석은 송전선 제약의 영향뿐만 아니라 송전선 혼잡권리(Transmission Congestion Right), 거래가격 지불방식, 풀/양방향거래 비교 등의 연구에서도 활용될 수가 있다. 한편 불완전 경쟁에 대한 여러 가지 해석모형들은 적용되는 가정과 목적이 조금씩 다르기 때문에 실제의 현상을 적합하게 해석하는 모형은 전력거래 방식, 정산가격 결정 방식 등 전력시장의 규칙과 특성에 따라 달라질 수가 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Borenstein, J. Bushnell, E. Kahn and S. Soft, "Market Power in California Electricity Market," Utility Policy, Vol.5, No.3, pp219-236, 1995.
- [2] C. A. Berry, B. F. Hobbs, W. A. Meroney, "Analyzing Strategic Behavior in Transmission Networks," IEEE Tutorial on Game Theory in Electric Power Markets, IEEE Press TP-136-0, pp.7-32, 1999.
- [3] J. B. Cardell, C.C. Hitt, W.W. Hogan, "Market Power and Strategic interaction in Electricity Networks," Resource and Energy Economics, Vol.19, pp109-137, 1997.
- [4] D.W. Carlton, J.M. Perloff, *Modern Industrial Organization*, Addison-Wesley, 2000.
- [5] T.J. Overbye, K. Pattern, "Assessment of Strategic Market Power in Power Systems," IEEE PES Summer Meeting, pp.297-302, 1998.
- [6] S. Stoft, "Using Game Theory to Study Market Power in Simple Networks," IEEE Tutorial on Game Theory in Electric Power Markets, IEEE Press TP-136-0, pp.33-40, 1999
- [7] J.D. Weber and T.J. Overbye, "A Two-Level Optimization Problem for Analysis of Market Bidding Strategies," IEEE PES Summer Meeting, Vol.2, pp.682-687, 1999.
- [8] J. B. Park, B.H. Kim, J.H. Kim, M.H. Jung, and J.K. Park, "A Continuous Strategy Game for Power Transactions Analysis in Competitive Electricity Markets," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.16, No.4, pp.847-855, November 2001.
- [9] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*, The MIT Press, 1991.
- [10] C.E. Lemke and J.T. Howson, "Equilibrium Points of Bimatrix Games," SIAM Journal of Applied Mathematics 12, pp.413-423, 1964.

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