

전력 수요함수에 따른 공급자의 입찰전략 연구

조철희\*, 최석근, 이광호,  
단국대학교 전기공학과

A Study of Supplier's Bidding Strategies  
by Piecewise Demand Function

Cheol-Hee Cho\*, Seok-Keun Choi, Kwang-Ho Lee  
Dankook University

**Abstract** - In electricity market with a imperfect competition, participants make plans of biddings and transaction strategies to maximize their own profits. The market price and the quantity are determined by bidding systems and market demands. Practically the characteristics of power demand have rather two forms: elastic region and inelastic region, than constant slope elasticity. Furthermore the price cap in the market can be modelled as a region of perfect elasticity in the demand function. This paper analyses supplier's bidding strategies which are reflected the characteristics of practical demand. Equilibrium strategies are solved by using the Bertrand model and payoff matrices.

1. 서 론

전력산업의 구조가 수직통합형에서 수평분산형으로 바뀔 때 따라 발전 사업자간의 경쟁이 도입되었다. 그러나 전력산업의 특성상 소수의 공급자와 다수의 소비자가 존재하는 과점 형태의 불완전경쟁이 나타나고 이 때 거래 가격은 입찰방식과 시장수요함수에 의해 결정된다.

시장수요함수는 가격탄력성을 갖는 것으로 가정하여 일차함수로 두는 것이 일반적이다[1]. 하지만 실제 전력수요특성은 일정한 기율기의 탄력성을 갖기 보다는 수요량에 따라 탄력성을 갖는 구간과 비탄력성을 갖는 구간이 나타난다. 또한 가격상한선이 부과되어 일부에서는 완전탄력적인 구간도 갖게 된다[2].

본 연구에서는 Bertrand 모형으로 거래방식을 설정하고 이득행렬법으로 내쉬균형점을 계산하여 실제 전력수요 특성이 반영된 수요함수에서 구간별로 탄력성이 다르게 나타날 때 공급자의 입찰 전략을 분석한다[3].

2. 시장 수요특성을 반영한 내쉬균형점

2.1 Bertrand 모형에서의 내쉬균형점

Bertrand 모형은 공급자의 입찰가격에 의해 공급량과 가격이 결정되는 것이다. 이 때 전력은 동일한 품질의 상품이고, 수요자는 낮은 가격의 제품을 구매할 것이라는 가정에서 출발한다. 공급자는 자신의 이득을 극대화할 수 있는 입찰가격을 제시할 것이고, 가장 낮은 가격으로 입찰한 공급자가 전체수요를 담당하게 될 것이다. 하지만 발전량은 한계비용과 최대발전량에 의해 제한을 받게 된다. 따라서 잔여수요에 대해 그 다음으로 낮은 가격을 입찰한 공급자가 차례로 수요를 담당하는 방식이다.

두 공급참여자를 각각 N1, N2, 수요를 N3라 하고, 참여자의 발전량과 수요량을  $q_1, q_2, q_3(=q_1+q_2)$ , 한계비용함수를 각각  $f_1(q_1)=b_1+m_1 \times q_1, f_2(q_2)=b_2+m_2 \times q_2$ , 수요함수를  $f_3(q_3)=b_3+m_3 \times q_3$ 로 둔다. 이 때 표1은 입찰가격

에 따른 N1과 N2의 공급량을 나타낸다. N1과 N2의 입찰가격을 각각  $p_1, p_2$ 라 할 때,  $p_1 < p_2$ 이면 N1이 공급을 주도하여 한계비용이  $p_1$ 과 같아지는 점에서  $q_1$ 이 결정되고 잔여수요( $R_2=d_2(p_2)-q_1$ )에 의해  $q_2$ 가 결정된다.  $p_1 > p_2$ 이면 N2가 공급을 주도하여  $q_1$ 은 잔여수요로부터 결정된다.

표 1 입찰가격에 따른 발전량

	$p_1 < p_2$	$p_1 > p_2$
$q_1$	$q_1 = \max(\min(q_1, \max, d_1(p_1), d_3(p_1)), q_1, \min)$	$q_1 = \begin{cases} 0 & \text{if } R_1 = d_1(p_1) - q_2 \leq q_1, \min \\ R_1 & \text{if } q_1, \min < R_1 < q_1, \max \\ q_1, \max & \text{otherwise} \end{cases}$
$q_2$	$q_2 = \begin{cases} 0 & \text{if } R_2 = d_2(p_2) - q_1 \leq q_2, \min \\ R_2 & \text{if } q_2, \min < R_2 < q_2, \max \\ q_2, \max & \text{otherwise} \end{cases}$	$q_2 = \max(\min(q_2, \max, d_2(p_2), d_3(p_2)), q_2, \min)$

여기서  $d_1, d_2, d_3$ 는 각각  $f_1, f_2, f_3$ 의 역함수이다.  $q_1, \max, q_1, \min, q_2, \max, q_2, \min$ 은 N1, N2의 최대, 최소발전능력이다. 이처럼 입찰가격과 발전량조건에 따라 공급량이 불연속적으로 정해지고 이득함수도 불연속적으로 나타나므로 해석적 방법으로 내쉬균형점을 계산하기는 어렵다. 그래서 Lemke 알고리즘[4]을 이용하여 내쉬균형점을 계산하면 가격전략은 확률분포를 갖는 복합전략으로 나타난다[5]. 여기서 계산한 수요함수가 일정한 기율기의 일차함수일 때의 균형전략 분포를  $Po$ 로 둔다. 그리고 이것을 변형된 수요함수에서의 결과와 비교한다.

2.2 가격상한선을 고려한 경우

전력시장에서 ISO(Independent System Operator)는 전력 수급 계획을 세우고 공급량을 조절한다. 하지만 정전과 같은 계통상의 문제나 기상 조건 등의 영향으로 전력수급이 맞지 않을 경우 가격은 급격히 상승할 수 있다. 이 때 ISO는 가격 상승을 제한하기 위해 가격상한선을 시장 공급자에게 부과한다[2]. 가격상한선과 수요함수의 관계를 나타내면 그림1과 같다. 여기서  $P_c$ 는 가격상한선이고  $Q_c$ 는 그때의 수요량이다.

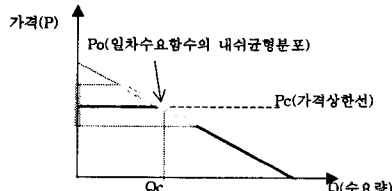


그림 1 가격상한선의 영향으로 변화된 수요함수

N1이  $p_1$ 으로 입찰할 때 입찰가격은  $p_1$ 과  $P_c$  중 낮은 가격이 선택된다. 선택된 입찰 가격을  $p_1^*$ 라고 하고 그 관계를 살펴보면 식(1)과 같다. N2도 N1과 같은 방식으로  $p_2^*$ 를 알 수 있다.

$$p_1^* = \min(p_1, P_c) \quad (1)$$

$$p_2^* = \min(p_2, P_c)$$

높은 가격으로 입찰하더라도 실제 입찰 가격은 가격상한선 이하에서 정해진다. 즉 가격상한선의 위치가 N1과 N2의 입찰 가격에 직접적인 영향을 미친다.

일반적으로 송전선 제약조건을 고려하지 않은 Bertrand 가격경쟁모형에서의 균형점은 연속범위를 갖는 복합전략으로 나타난다. 가격상한선을 고려하지 않은 일차수요함수의 내쉬균형 분포(Po)를 그림1과 같이 가정한다.

가격상한선이 Po내부에서 정해지면 새로운 수요함수는 일부구간이 가격상한선의 영향으로 그림1에서 실선부분으로 나타난다. Po에 속해있던 일부의 가격범위가 제외됨을 알 수 있다. 따라서 제외된 부분의 영향으로 N1과 N2의 이익이 변화됨을 예상할 수 있다. 하지만 가격상한선이 Po이상의 가격이면 Po의 영역과 무관하므로 N1과 N2의 이득에 영향이 거의 없을 것이다.

### 2.3. 일부구간에서 가격 탄력성이 영인 경우

실제 전력수요함수는 가격이 낮아짐에 따라 수요량이 계속 증가하지 않고 그림2에서의 Qf와 같은 일정한 수요에서 제한된다. 이러한 특성을 반영하기 위해 수요함수를 탄력성을 영으로 놓고 모형화 하기도 한다[2]. 그림2는 전력수요함수가 Q=Qf일 때는 가격 탄력성이 영으로 나타나고, Q<Qf인 경우는 일정한 기울기를 갖는 것을 나타낸다. Qf는 탄력성이 영일 때의 전력 수요량이고 Pf는 그 때의 가격이다.

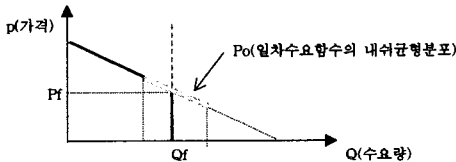


그림 2 가격탄력성이 영인 경우를 포함한 수요함수

N1과 N2가  $p_1$ 과  $p_2$ 로 입찰할 때  $p_1 < p_2$ 일 경우 N1이 전체 수요를 담당한다. 이 때  $q_1$ 은  $\max[\min(q_{1max}, d_1(p_1), d_2(p_1)), Qf]$ 이고,  $q_2$ 는 잔여수요( $R_2 = \min(d_2(p_1) - q_1, Qf$ )에 의해 결정된다.

Qf가 Po내에 있다면 Po를 포함하는 수요함수의 일부 구간이 Qf에 의해 가격탄력성이 0인 구간으로 바뀐다. 따라서 제외된 부분으로 인해 N1과 N2의 이득에 변화가 있을 것이고 입찰전략도 변할 것을 생각할 수 있다. Qf가 Po보다 큰 경우는 Po의 분포에 영향을 줄 수 없으므로 N1과 N2의 입찰 전략에도 변화가 없을 것이다.

## 3. 사례연구

### 3.1 내쉬균형점

공급자 N1과 N2의 한계비용함수와 N3의 수요함수는 각각 (2)와 같고, 사례계통모형은 그림3으로 나타낸다.

$$N1 : f_1(q_1) = b_1 + m_1 \times q_1$$

$$N2 : f_2(q_2) = b_2 + m_2 \times q_2 \quad (2)$$

$$N3 : f_3(q_3) = b_3 + m_3 \times q_3$$

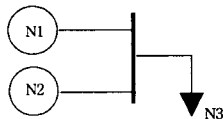


그림 3 사례모형계통

절편  $b_1, b_2, b_3$ 와 기울기  $m_1, m_2, m_3$ 는 각각 10, 5, 65와 0.25, 0.45, -5/24이다. N1과 N2의 최대 발전력은  $q_{1max}=150, q_{2max}=150$ 이고 최소발전력은  $q_{1min}=20, q_{2min}=20$ 이다.

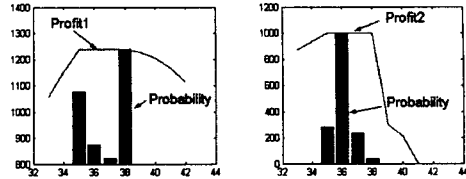
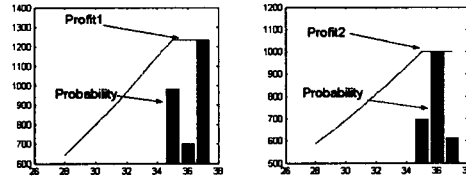


그림 4 일차수요함수의 내쉬균형

N1과 N2의 입찰가격의 범위를 1단위씩 나누어 33~42로 두고  $p_1$ 과  $p_2$ 를 변화시키면서 N1과 N2의 이득 행렬을 만든다. Lemke 알고리즘을 써서 N1과 N2의 균형전략을 계산한다. N1과 N2는 그림4와 같이 35~38사이의 범위에서 균형전략이 나타나고 이 범위의 어떤 값을 택하더라도 N1과 N2는 최대이득을 얻게 되므로 내쉬균형을 이룬다고 할 수 있다[3]. 균형전략이 확률로 나타나기 때문에 이득 및 가격은 기대값으로 계산된다. 기대가격은  $p_1=36.76, p_2=36.02$ 이고 기대이득은  $S_1=1238.4, S_2=1000$ 이다. 여기서 계산된 균형전략(35~38)을 비교기준으로 삼아 변화된 수요함수의 영향을 살펴본다.

그림 5 가격상한선을 고려한 내쉬균형



다음은 가격상한선의 영향을 고려하여 그림1과 같이 수요함수의 일부구간이 가격상한선으로 바뀐 경우이다. 가격상한선을 기준분포(35~38)에 포함된 가격인 37로 두고 내쉬균형을 계산하면 그림5의 균형전략이 나타난다. 이 경우 기대가격은  $p_1=36.22, p_2=35.90$ 이고 기대이득은  $S_1=1234.5, S_2=1000$ 이다.

그림4와 그림5를 비교하면 35~38의 구간이 35~37로 바뀌는 것을 알 수 있다. 37을 초과하는 가격은 가격상한선을 37로 두었기 때문에 나타나지 않고, 38에 나타났던 분포는 37이하로 이동한 것으로 해석된다. 이때 N2의 기대이득은 같고 N1은 약간 감소한다. 따라서 가격상한선이 37일 경우 공급자 이득에 미치는 영향이 매우 적다.

다음은 가격탄력성이 영인 구간이 포함될 때의 분석결과이다. Qf(Pf=37.08)를 134로 두어 수요함수의 일부 구간이 그림2와 같이 가격탄력성이 영인 부분으로 바뀐 경우이다. 그림6은 N1과 N2의 입찰가격의 범위를 32~41로 1단위씩 나누고 이득행렬을 만들어 내쉬균형을 계산하여 나타난 것이다. 계산된 기대가격은  $p_1=36.90, p_2=36.25$ 이고 기대이득은  $S_1=1231.8, S_2=1000$ 이다.

그림4와 그림6을 비교하면 균형전략의 구간은 같게 나타났고, N1의 기대이득은 약간 감소하고 N2의 기대이득은 같다. Qf가 134일 경우 균형전략의 구간은 같지만 확률분포는 다르고 이득의 변화는 매우 적게 나타난다. 가격상한선이나 Qf가 기준전략에 속하는 값일 경우 공급자의 이득에 미치는 영향을 클 것으로 생각되었으나 공급자 N1과 N2의 이득에 미치는 영향이 매우 적게 나

타났다.

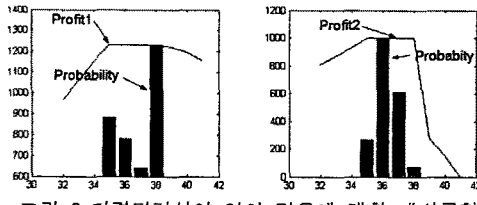


그림 6 가격탄력성이 영인 경우에 대한 내쉬균형

### 3.2 N1과 N2의 이득 및 소비자의 효용 비교

가격상한선과 기준분포(35~38)와의 관계를 알아보기 위해 가격상한선의 범위를 31~40까지 변화시키면서 N1과 N2의 기대가격을 계산하면 표2와 같다. 가격상한선이 35보다 작은 값일 경우 가격상한선이 기준분포의 가격보다 낮기 때문에 균형전략은 가격상한선과 동일한 가격으로 정해지고 단순전략으로 나타난다.

38이상에서 정해진 가격상한선은 기준분포보다 큰 값으로 정해졌기 때문에 기준분포에 아무런 영향을 주지 못한다. 따라서 공급자의 입찰 전략은 기준분포일 때와 같은 복합전략이 나타날 것이다. 그리고 기대가격도 변하지 않고 36.77, 36.02로 동일하게 유지됨을 표2를 통해 알 수 있다.

35~38사이에서 기대가격은 완만하게 변화한다. 그리고 균형전략은 그림5에서 확인한 것처럼 가격상한선 이상에서 나타난 기준전략은 제외된 형태의 복합전략이 나타난다.

표 2 가격상한선과 기대가격

Pc	Pc									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
P1	31	32	33	34	35	35.66	36.22	36.77	36.77	36.77
P2	31	32	33	34	35	35.52	35.90	36.02	36.02	36.02

가격상한선 변화에 따른 공급자의 이득과 사회적 후생(Social Welfare)을 살펴보면 그림7과 같다. 사회적 후생은 소비자 효용(Benefit)에서 발전비용을 뺀 값이다[1].

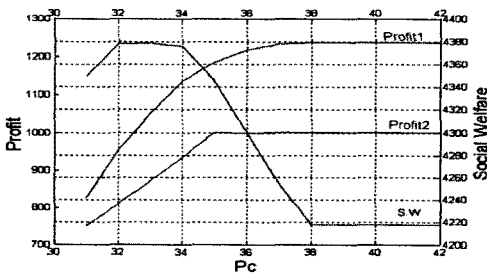


그림 7 Pc에 의한 이득 및 소비자 효용의 변화

그림7에서 가격상한선이 38이상이면 N1과 N2의 이득이 모두 일정하다. 35~38사이에서는 N2의 이득이 38 이상에서와 같고, N1의 이득은 서서히 감소한다. 35이하에서는 N1과 N2의 이득이 급격히 감소하는 경향을 보인다.

가격상한선이 38이상에서는 공급자 N1과 N2의 이득이 변하지 않으므로 전략에 영향을 미치지 않는다. 하지만 38이하에서는 가격상한선으로 인해 두 공급자의 이득이 변화하므로 입찰 전략에서 많은 변화가 나타난다.

가격상한선이 32~34의 범위에 있을 때 사회적 후생이 최대이므로 사회적 후생(S.W.) 측면에서 이 구간에 가격상한선을 두는 것이 바람직하다.

가격탄력성이 영인 구간이 포함된 경우 이득 및 사회적 후생에 대해서 살펴보면 그림8과 같다. 기준분포의 가격

35~38은 수요함수의 수요전력 119.6~144MW에 해당된다.

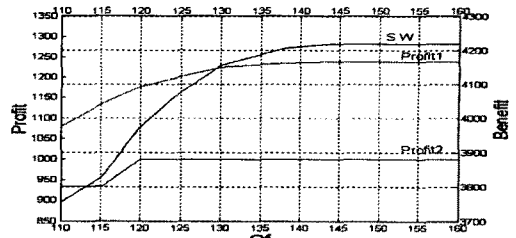


그림 8 Qf에 의한 이득 및 소비자 효용의 변화

Qf가 144MW 이상에서는 N1과 N2의 이득과 사회적 후생의 변화가 없다. 두 공급자 이득의 변화가 없으므로 공급자 전략에 영향을 미치지 못할 것이다. Qf가 119~144MW 사이에서는 N2의 이득은 변화가 없고 N1의 이득과 사회적 후생은 서서히 감소한다. 따라서 N1의 입찰 전략은 변화하지만 N2의 입찰 전략은 변하지 않을 것이다. Qf가 119MW 이하에서는 두 공급자의 이득과 사회적 후생이 급격히 감소하므로 이득이 변함에 따라 두 공급자의 입찰전략도 변하게 될 것이다.

## 4. 결 론

전력시장이 수직통합형에서 수평분산형으로 개편됨에 따라 기업은 더 많은 이득을 얻기 위한 전략을 세우고 경쟁하게 될 것이다. 가격상한선이나 기술기 영인 수요곡선과 같은 실제 전력수요특성을 반영한 수요곡선에서 기업의 이득에 대한 연구는 기업의 입찰 전략 수립을 위해 필요한 연구이다.

본 연구에서는 과점해석 모형인 Bertrand 모형을 사용하고 실제 전력수요함수의 특성을 고려하여 기업의 입찰 전략이 미치는 영향을 분석하였다. 즉 가격상한선이 포함될 때와 그렇지 않을 때, 가격탄력성이 0일 경우의 수요량이 수요함수에 반영될 때와 그렇지 않을 때에 대한 공급자의 입찰 전략이 다르게 나타남을 확인하였다.

향후 계통에서 전력수요함수의 특성뿐 아니라 송전선 제약과 같은 제한조건까지 고려하여 Cournot, 공급곡선기법, Bertrand 모형으로 입찰전략을 분석하는 연구가 필요 할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라우축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 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 T-136-0, pp. 7-32, 1999.
- [2] M. Shahidehpour, M. Alomoush, *Restructured Electrical Power Systems*, Marcel Dekker, 2001
- [3] 이광호, "전력거래에서 제약조건이 고려된 내쉬 균형점의 복합전략 연구," 전기학회논문지, 51A권 4호, pp.196-201, 2002. 4.
- [4] C. E. Lemke and J.T. Howson, "Equilibrium Points of Bimatrix Games," *SIAM Journal of Applied Mathematics* 12, pp.413-423, 1964. 01.
- [5] 이광호, "송전선 제약조건에 따른 전력거래에서의 시장지배력 연구," 전기학회논문지, 51A권 8호, pp.403-408, 2002. 8.