

우리나라 전력시장 규칙을 기반으로한 내쉬균형 해석

신재홍\*, 이광호\*, 김욱\*\*  
 단국대학교\*, 한국남부발전\*\*

Analysis of Nash Equilibrium based on the Korean Electricity Market Rules

Jae-Hong Shin\*, Kwang-Ho Lee\*, Wook-Kim\*\*  
 Dankook University\*, Korea Southern Power Co., Ltd\*\*

**Abstract** - 본 연구는 우리나라의 전력시장 운영규칙을 근간으로 경제학적 모형을 수립한다. SMP를 평균비용으로 고려하였으며 용량가격을 포함하여 발전사의 이득을 계산하였다. 그리고 제한한 모형에서 게임이론을 활용하여 경쟁의 균형인 내쉬균형을 계산하고 검증하였다. 또한, 경쟁의 균형에서 전력시장의 효율성을 최대로 하는 임계 용량가격을 계산하는 방법과 결과를 제시하였다.

1. 서 론

우리나라의 전력산업은 변동비반영시장(Cost Based Pool : CBP)으로 발전입찰에 참여한 발전기에 대해 사전에 평가된 최대용량, 발전비용특성 및 비용의 변동특성을 기초로 경제적 급전계획을 세우는 방식이다. 그리고 적절한 용량을 확보하기 위해 발전비용과는 별도로 발전용량에 대해 요금을 지불하는 용량가격(Capacity Price : CP) 제도가 사용되고 있다[1].

본 연구는 CBP 시장에서 발전가능용량의 선택이 전략적으로 이루어지는 경쟁시장에서 균형상태에서 나타나는 현상을 분석하기 위해 게임이론을 활용하여 접근을 시도한다. 그리고 용량가격에 따라 전략적 용량철회(Capacity Withholding)가 억제되는 현상을 분석한다.

2. 전력시장의 모형화

우리나라의 전력시장은 과점시장으로 시장지배력이라 정의되는 발전기업의 전략적 행동이 가격에 영향을 미치는 시장구조이다. 또한, 발전기업이 시장지배력을 행사하는 경우, 경쟁시장의 효율성이 감소한다는 것은 잘 알려져 있다.

기업의 시장지배력을 줄이기 위한 가격정책은 전력가격을 한계비용(Marginal Cost)에 근거하여 가격을 결정하는 것이다. 하지만 전력가격이 평균비용보다 작은 경우 발전사는 적자가 발생하고 결국, 시장에서 퇴출하는 불안정한 상황이 발생할 수 있다. 때문에 전력가격을 평균비용으로 책정하는 것이 적합하다는 주장이 있다. 하지만, 평균비용으로 전력가격을 결정한다면, 자원배분의 효율성을 저해하는 단점이 있다.

우리나라 전력시장은 발전기업의 적자를 막기 위해 계통한계가격이라 칭하는 SMP(System Marginal Price)를 평균비용으로 결정하고 발전량은 자원배분의 효율성을 높이기 위해 한계비용을 근거로 배분한다. 구체적으로 발전계획은 전력의 거래가치를 최대한 높이기 위해 한계비용을 활용하여 수립하고 계통한계가격은 발전계획에 포함된 발전기의 평균비용 중 가장 높은 가격으로 결정함으로써 발전사의 적자를 방지하는 복합적인 방식을 채택하고 있다.

우리나라의 입찰시장은 2차 함수 형태인 비용함수와 발전가능용량이 발전기업의 전략적 유인을 반영할 수 있는 전략변수가 될 가능성이 있다. 전력시장 운영규칙에 의하면 발전비용함수의 열량계수는 배분기마다, 열량단가는 매월 제출하도록 되어 있으며 비용평가위원회에서 평가하기 때문에 매번 입찰시마다 이를 전략적으로 수정하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 비용관련 함수를 발전기의 실제 비용함수로 가정하고 매 입찰시마다 제출되는 발전가능용량을 전략변수로 두어 경쟁모형을 수립하고 이에 대한 균형전략을 분석한다.

전력 에너지의 안정적인 공급을 위해 예비전력은 항상 필요하다. 이러한 예비전력의 확보와 관련되어 여러 가지 개념이 사용되고 있는데 우리나라에서는 용량요금방식을 사용하고 있다. 시장운영자 입장에서는 발전용량에 대해 급전적 보상을 함으로써 발전사가 최대발전용량을 정확하게 입찰하도록 유도하려고 한다. 하지만 발전사 입장에서는 용량의 가격에 따라 최대용량을 정확한 값으로 선택할 것인지 전략적인 용량철회를 선택할 것인지 이득 측면에서 비교할 것이다[2]. 그러므로 본 연구는 용량가격이 경쟁의 균형인 내쉬균형에 미치는 영향에 대해 분석하여 완전경쟁(Perfect Market)으로 유도하는 적절한 CP에 대해 분석한다.

3. 평균비용 가격체제에서 내쉬 균형

3.1. 최적화 문제 표현

정식화 모형은 발전기업  $G_1, G_2$ 가 경쟁에 참여한 것을 대상으로 하며 송전선로제약 등의 제약조건은 고려하지 않는다. 비용함수는 전력시장 운영규칙과 동일하게 2차 함수로 정의하며, 수요특성은 탄력성을 고려한 일차함수로 가정한다. 또한, 발전사의 전력변수는 최대발전용량으로 고려한다. 발전사업자  $i$ 의 비용함수 그리고 수요특성을 표현하면 식 (1)~ 식 (2)와 같다.

$$\text{비용함수} : Cost_i(q_i) = A_i + B_i q_i + C_i q_i^2 \quad (1)$$

$$\text{수요특성} : D(d) = b_0 - m_0 d \quad (2)$$

$q_i$  : 전력거래량  $A_i$  : 비용함수의 절편  
 $B_i$  : 비용함수의 일차 계수  $C_i$  : 비용함수의 2차 계수  
 $b_0$  : 수요특성의 절편  $m_0$  : 수요특성의 기울기  $d$  : 수요

시장운영자는 발전기업이 제출한 비용함수와 수요특성을 바탕으로 자원을 효율적으로 배분하는 발전량을 결정한다. 만약, 수요가 비탄력적이 라면 발전비용을 최소화시키는 발전량이 결정되지만, 수요가 가격에 따라 탄력적인 경우에는 전력의 시장거래가치를 극대화시키는 발전량으로 결정된다[3]. 이를 최적화 문제로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\arg_q \max SW \left\{ (Benefit(d) - \sum_j Cost_j(q_j)) \right\} \quad (3)$$

$$s.t. \quad d = \sum_j q_j$$

사회적후생(Social Welfare : SW)라 불리는 시장거래가치는 식 (3)과 같이 소비자만족(Benefit)에서 발전비용(Cost)을 뺀 값으로 계산된다. 시장운영자는 위와 같은 최적화 문제를 해결하여 발전량을 결정하고 계통한계가격을 결정한다.

우리나라의 SMP 결정방법은 발전계획에 포함된, 즉 식 (3)과 같은 최적화문제를 풀어서 발전하도록 지시된 발전기의 발전량 중 평균비용이 가장 높은 발전기의 평균비용을 SMP로 결정한다. 이를 식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\arg_{SMP} \max \{ AC_i(q_i) \} \quad (4)$$

$AC_i$  : 평균비용

반면, 발전기업은 시장운영자에 의해 결정되는 발전량과 가격결정 방법을 고려하여 전략적인 행태를 취한다. 발전기업의 전략적 행동의 목적은 이득극대화이며 아래 식 (5)와 같은 최적화 문제로 표현된다.

$$\max \pi_i \{ = SMP \cdot q_i - Cost_i(q_i) + CP \cdot \bar{q}_i \} \quad (5)$$

$CP$  : 용량요금  $\bar{q}_i$  : 최대발전용량

발전기업의 이득은 식 (5)와 같이 발전량에 대한 이득(발전이득)과 입찰한 공급가능용량에 비례하여 할당받는 용량이득이 모두 포함된다. 때문에 발전기업은 발전이득과 더불어 용량이득도 고려하여 전략적 유인을 결정해야한다.

발전사가 완전경쟁에서 결정되는 발전량보다 적은 용량으로 입찰하는 경우, 상대적으로 작은 한계비용을 갖기 때문에 식 (5)에  $q_i$ 와  $\bar{q}_i$ 는 일

찰용량과 동일하다. 여기서, 용량 철회시 한계비용이 낮아지는 이유는 한계비용함수가 우상향하는 일차함수로 나타나기 때문이다.

SMP를 결정하는 발전기업은 자신의 평균비용으로 SMP가 결정되기 때문에 용량이익만 나타나고 SMP를 결정하지 않는 발전기업은 용량이익과 더불어 발전이익도 나타난다. 이는 SMP 결정 발전기의 경우 발전이익을 계산하는 식에 나타난 수입 ( $SMP \cdot q = AC \cdot q$ )과 비용 ( $Cost(q) = AC \cdot q$ )이 동일하기 때문이고 SMP 비결정 발전기의 경우, SMP가 평균비용보다 크기 때문에 발전이익은 항상 0보다 크게 된다.

### 3.2. 사례연구

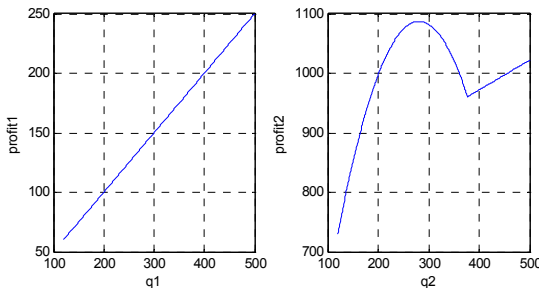
대상계통은 발전력 제약이 없는 발전기업 G1, G2가 발전시장에 참여하고 부하는 하나의 집중된 수요함수로 가정한다. G1은 120MW부터 500MW까지 발전이 가능하며  $A_1=16$ ,  $B_1=11$ ,  $C_1=0.0054$ 의 비용특성 계수를 갖는다. 반면, G2는 G1과 동일한 발전력제약이 있으나  $A_2=7$ ,  $B_2=7$ ,  $C_2=0.0088$ 의 비용특성을 가진다. 수요특성은  $m_0=0.3$ ,  $b_0=200$ 의 탄력성을 갖는 것으로 가정하고 용량가격 CP는 0.5로 설정한다. 그 외 선로 제약 등의 계통제약은 고려하지 않는다.

발전사가 전략적으로 용량철회를 하지 않고 최대용량을 정확히 입찰하는 경우, 급전결과에 완전경쟁의 결과와 일치한다. 그리고 완전경쟁 시장은 자원배분의 효율성이 가장 높은 시장이다. 그러므로 완전경쟁과 과점시장의 내쉬균형에서 사회적후생을 비교하면, 완전경쟁에서 더 큰 값이 계산될 것이다. 이에 대한 정확한 계산결과는 표 1에 나타나 있다.

〈 표 1 〉 과점시장 내쉬균형과 완전경쟁 균형 비교

구분	SMP	$q_1$	$q_2$	SW
완전경쟁	12.4	500	500	59436
과점시장	12.9	500	281	59306

완전경쟁과 과점시장에서 G1은 동일하게 최대발전량을 입찰하나 G2는 용량을 줄여 입찰한다. 용량을 줄인다는 것은 CP가 감소하여 용량이익이 감소하지만 그보다 큰 발전이익이 나타나기 때문에 G2는 용량을 줄여 입찰한다. 이와 같은 논리를 검증하기 위해 한계이익을 계산해보면 아래 그림 1과 같다.



〈 그림 1 〉 입찰용량 증가에 따른 한계이익 비교

G1의 한계이익 그래프를 살펴보면, 입찰용량이 증가할수록 일정하게 증가한다. 이는 G1이 SMP를 결정하는 발전기업이기 때문에 발전이익은 없으나 용량이익이 계속 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 결국, G1은 최대발전량의 정확한 값을 입찰해야 최대 이익을 얻는다.

G1의 한계이익은 CP 기울기를 가진 일차함수 형태이지만, G2는 한계이익영역이 분리되는 현상이 나타난다. 이는 G2가 완전경쟁에서 결정되는  $q_2$  이상으로 입찰을 해도 식 (3)에 의해 결정되는 발전량에 영향을 주지 못하기 때문에 나타난다. 결국, G2는 최대발전량 입찰시 이익과 용량철회시 최대이익을 비교하여 전략을 선택한다.

## 4. 완전경쟁 유도 용량가격

### 4.1. 계산기법

완전경쟁균형에서 사회적후생이 가장 크며 사회적후생은 소비자 잉여(Surplus)와 생산자 잉여를 합한 시장참여자 전체의 총 잉여를 의미한다. 그러므로 시장운영자는 적절한 제도적 장치를 고안하여 이를 유도해야 하는데, 본 연구에서는 용량가격으로 완전경쟁을 유도하는 임계(Critical) 용량가격을 계산하고자 한다.

완전경쟁으로 유도한다는 것은 발전사가 최대용량을 제출하였을 때의 이익이 용량철회를 하는 것보다 커야한다는 것을 의미하므로 CP를 변수로 고려하고 식 (6)과 같은 제약조건을 설정한다.

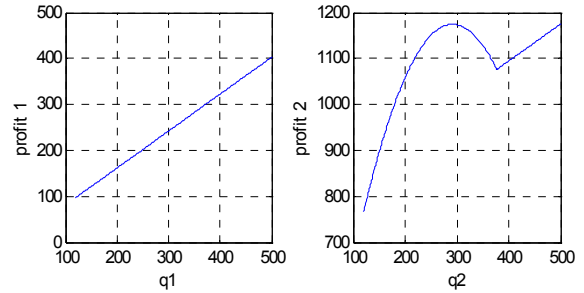
$$\pi_{i,w} = \pi_{i,max} \quad (6)$$

$\pi_{i,w}$  : 용량철회시 이익       $\pi_{i,max}$  : 최대용량 입찰시 이익

또한, 발전사의 전략적 유인이 반영된 시장을 고려하기 위해 3절의 최적화문제를 그대로 제약으로 고려하며 내쉬균형상태에서 완전경쟁을 유도하는 용량가격을 계산한다.

### 4.2. 사례연구

대상모형은 3.3절과 동일하다. G2의 최대용량이 500MW인 경우, 임계 용량가격을 계산하면 0.81로 계산된다. 임계 용량가격에서 용량철회시 이익과 최대용량 선택시 이익이 동일할지를 확인하기 위해 한계이익을 계산하면 그림 2와 같다.



〈 그림 2 〉 임계 CP에서 한계이익 비교

임계 용량가격에서 G2가 최대용량 500MW를 선택하는 경우와 용량철회시 이익이 동일함을 확인할 수 있다. 그러므로 CP가 0.81보다 크게 설정되면 G2는 최대용량을 정확히 선택하게 된다.

CP가 변경되어도 용량철회 전략은 큰 차이가 없다. 구체적으로 3.2절과 같이 CP가 0.5인 경우, 용량철회 전략은 281이고 CP가 0.81인 경우 용량철회 전략은 281이다. 즉, CP의 변경이 용량철회 전략에 미치는 영향이 적다.

이상의 결과로부터, CP가 클수록 최대용량을 전략적으로 선택할 가능성이 크다고 예상할 수 있다. 아래 표 2는 이러한 예상을 확인하기 위해 G2의 최대용량을 400MW, 500MW, 600MW로 변경시키며 임계 CP를 계산한 결과이다.

〈 표 2 〉 G2의 최대용량에 따른 임계 용량가격

구분	G2의 최대용량[MW]		
	400	500	600
임계 용량가격	1.68	0.81	0.55

최대용량이 클수록 용량이익이 커지기 때문에 완전경쟁을 유도하는 임계 CP는 작아진다. 결론적으로, 완전경쟁의 균형상태는 최대용량이 클수록 나타날 가능성이 크다는 것과 CP가 클수록 용량철회 유인이 적어짐을 확인할 수 있다.

## 3. 결 론

본 연구는 우리나라의 전력시장에 대한 경제학적 모형을 수립하였다. 구체적으로 SMP를 평균비용으로 고려하였고 용량가격을 포함하여 시장운영자와 발전사의 최적화 모형을 수립하였다.

또한, 수립된 모형에서 내쉬균형을 계산하고 이를 검증하였다. 마지막으로, 전력거래의 효율성을 최대로 하는 임계 용량가격을 계산하는 방법과 결과를 제시하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 한국전력거래소, 전력시장운영규칙, <http://www.kpx.or.kr>
- [2] 이광호, "전력시장에서 발전가능용량의 전략적 입찰에 대한 게임이론적 해석," 대한전기학회 논문지, 53권, 5, pp. 302-307, 2004. 5.
- [3] 신재홍, 이광호, "부하패턴을 이용한 전력시장 정보의 불완비성 추정에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 56권, 5, pp. 848-853, 2007. 5.