

게임이론을 적용한 전력거래 해석

Power Transaction Analysis using Game Theory

朴滿根* · 金發鎬** · 朴宗培*** · 丁萬鎬§

(Marn-Geun Park · Bal-Ho Kim · Jong-Bae Park · Man-Ho Jung)

Abstract - The electric power industries are moving from the conventional monopolistic or vertically integrated environments to deregulated and competitive environments, where each participant is concerned with profit maximization rather than system-wide costs minimization. Consequently, the conventional least-cost approaches for the generation resource schedule can not exactly handle real-world situations. This paper presents a game theory application for analyzing power transactions and market design in a deregulated energy marketplace, where the market participants determine the net profits through the optimal bidding strategies. The demand elasticity of the energy price is considered for the realistic modeling of the deregulated marketplace.

Key Words : deregulated market, power transaction, optimal bidding strategies, net benefit, demand elasticity

1. 서론

전통적으로, 수직 통합체제를 유지해 오던 전력산업에 시장경쟁이 도입되면, 비용최소화라는 중앙집중적인 급전계획에 수정이 불가피하게 된다. 최근 들어 전력시장은 전 세계적으로 단일독점 또는 수직통합된 환경에서 탈피해 민영화, 규제완화 더 나아가 경쟁적 환경으로 변화하고 있다. 따라서 계통 전체의 비용최소화를 위한 급전계획은 경쟁적 상황과는 배치되는 계통운영방법이 되었다[1,2].

규제완화가 전력시장에 현실화되면서 이 새로운 환경에서의 계통운영의 효율성을 극대화하기 위한 방안이 당면 과제로 떠오르게 되었다. 또한 경쟁체제로 전환된 전력시장에 참가한 발전사업자나 공급업자는 계통전체의 비용 최소화보다는 자신의 이익을 극대화하는 것에 관심을 집중하게 된다[3,4].

경쟁체제로 전환된 시장모형은 대표적으로 전력 풀(Pool), 쌍방거래모형(bilateral model), 그리고 Pool과 쌍방거래모형의 혼합형을 들 수 있다[2]. 이중 본 논문에서는 개방된 시장구현을 위해 풀모형을 채택하기로 한다. Pool모형은 발전사업자들이 가격과 발전량을 입찰하고 ISO(Independent System Operator)와 같은 형태의 Pool 운영자에게 필요한 정보를 제공하게 된다. 그 다음 발전사업자가 입찰한 가격과 발전량에 의해 형성된 공급곡선과 계통의 수요가 만드는 수요곡선이 만나는 점에서 현물가격(spot price)이 형성되며, 이 현물가격은 계통의 제약조건을 고려

한 상태에서 가장 마지막으로 기동허가되는 발전사업자가 입찰한 가격으로 결정된다[2,5]. 이러한 형태의 시장 메커니즘으로 Pool이 운영되므로 개별 발전사업자는 이익을 극대화시키는 입찰 발전량과 가격을 설정하기 위한 의사결정을 해야 한다. 또한 전력시장에서 자신의 이익을 극대화하기 위해서는 자신의 입찰가격과 발전량 뿐 아니라 상대의 입찰 가격과 발전량을 모두 고려해야 하므로 미시경제학의 한 분야인 게임이론을 적용하기에 매우 적합한 상황이라고 할 수 있다[6,7]. 그리고 게임은 한번으로 끝나는 게임(one-shot game)이 아니라 지속적으로 행해지는 게임(continuous game)이며, 개별 사업자들은 이러한 연속 게임을 통해 자신은 물론이고 상대에 대한 정보, 즉 상대의 비용함수를 파악하고 있다는 가정 하에서 개별 발전사업자의 이익을 극대화하는 의사결정을 보다 체계적으로 할 수 있게 된다.

경쟁체제하에서 발생하는 전력거래를 게임이론을 통해 보다 체계적인 해석이 가능해지리라 기대되며, 전세계적으로도 경쟁상황하에서의 전력계통에 관련된 문제해결을 방안으로 게임이론 적용을 위한 많은 연구가 활발히 진행중이다[8-10].

2. 개방된 전력시장에서의 전력거래

2.1 전력거래 게임

본 논문에서는 전력시장에 참여하는 시장참가자가 자신들의 입찰전략을 분석할 수 있도록 게임이론을 적용하였다. 지금까지의 게임이론은 전력시장이 개방된 이후로 시장참가자의 전략수립과 시장참가자에게 비용을 할당하기 위해 이용되어 왔다. 본 논문에서는 시장에 참가한 전력회사간에 협조가 없는 비협조적인 게임상황과 이 비협조게임에 대한 Nash균형 개념을 도입하였다. 즉 전력 Pool 내에서 시장참가자 간의 전력거래는 시장참가자 자신들의 이익 극대화를 경쟁한다는 측면에서 이 비협조적게임이 적용 가능하며, 이러한 문제를 본 논문에서는 전력거래게임이라고 명기했다.

* 準會員 : 弘益大 電氣情報制御工學科 碩士課程
 ** 正會員 : 弘益大 電氣情報制御工學科 助教授 · 工博
 *** 正會員 : 安養大 電氣電子工學科 助教授 · 工博
 § 正會員 : 韓國電力公社
 接受日字 : 1999年 11月 6日
 完了日字 : 2000年 5月 15日

이 게임에서 시장참가자가 높게 입찰하거나 낮게 입찰하는 것들은 전략(strategies)으로 정의된다. 또한 입찰이 전력시장에서 무한 반복되어 시장참가자들은 상대의 비용함수에 대한 정보를 알 수 있게 되므로 이 게임을 완전정보게임(complete information game)으로 생각할 수 있으며, 전력거래가 통한 경제적 이익인 보상(payoff)에 대한 정보도 가지게 된다[11,12].

2.2 게임이론의 적용

경쟁체제인 전력시장에 게임이론을 적용하기 위해 아래와 같이 몇 가지 가정을 두기로 한다.

- 전력시장에 참여하는 발전사업자들이 입찰한 전력량이 계통부하 전체를 공급할 수 있는 충분한 양이어서 시장에서는 전력의 부족 현상이 절대 나타나지 않는다.
- 전력시장에 참여하는 발전사업자들은 시장지배력 편중에 의한 폐해를 방지하기 위해 적정규모로 비슷한 설비용량을 갖도록 분할되어 있다. 따라서 단일발전사업자가 계통전체부하를 공급할 수는 없다.
- 현물시장에는 부하를 공급하는 둘 또는 그 이상의 시장참가자가 존재한다.
- 시장에서 전력가격에 대한 탄력성이 고려되어 가격에 대해 전력수요가 변동된다. 이러한 시장모형은 초기 전력시장 개방형태인 발전부문에서만 경쟁하는 형태에서만 단계 진보된 전력시장모형에 적용 가능하며, 실제 전력시장에 보다 가깝게 접근한 형태라고 할 수 있다.
- 송전손실과 계통혼잡 같은 계통 제약조건은 본 연구에서는 무시된다.
- 시장에 참가한 발전사업자의 비용함수 등의 모든 정보가 공개된다. 이 것은 전력시장을 완전 정보 게임으로 구현할 수 있음을 의미한다. 이 가정은 실제로 페루나 볼리비아, 한국 등지에서 적용사례를 찾을 수 있으며, 비용함수를 타 발전사업자와 계통운영자에게 공개한다는 측면에서 전통적인 경제급전정책과 매우 흡사한 급전 체계로 운영된다고 할 수 있다.

단일 전력회사가 시장을 독점하고 계통을 운용 할 때는 급전계획은 비용최소화에 그 주안점이 맞추어 졌었다. 하지만 경쟁도입을 통한 개별발전사업자가 시장에 참가하게 되면 각자의 이익이 극대화 되도록 전략을 수립하게 된다. 이를 위해서 전력시장에서는 시장가격과 입찰한 발전량, 그리고 할당된 발전량, 이익 등의 정보가 공개된다. 개별발전사업자의 비용함수는 다음과 같이 이차다항식으로 표현한다.

- 발전사업자(i)의 시간 t에서의 비용함수

$$C_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$$

여기서 $C_i(P_i)$ 는 발전사업자 i가 P_i 만큼 발전하는 데 소요되는 비용을 나타내며, 이 비용함수가 공개된 상황에서 개별 발전사업자의 비용편익을 분석하면 이익은 다음과 같다.

- 발전사업자(i)의 시간 t에서의 이득

$$PF_{i,t} = \rho_t P_{i,t}^{allocated} - C_i(P_{i,t}^{allocated})$$

ρ_t : 시간 t에서의 현물가격(spot price)

$P_{i,t}^{allocated}$: 발전사업자 i에게 시간 t에 할당된 발전량

일반적으로, 발전사업자 i가 할당받는 발전량은 한계발전량을 담당하는 발전사업자가 입찰한 가격보다 낮을 경우는 자신이 입찰한 발전량이 된다. 만약 발전사업자 i가 한계발전기가 된다면 i가 입찰한 가격으로 현물가격이 결정되며, 이에 따른 시간 t에서의 수요 D_t 가 결정되고 다른 발전사업자가 입찰한 발전량의 합을 뺀 나머지를 할당받게 된다. 현물시장에서의 전력수요는 일반상품처럼 가격에 대한 탄력성을 가진다.

- 시간 t에서의 전력수요

$$D_t = D_0 - S\rho_t$$

3. 2개 발전사업자가 참가하는 전력시장 분석

전력시장에 두 개의 발전사업자가 참여해서 이익 극대화를 위해 각자가 입찰하는 발전량과 가격을 어떻게 설정할 것인지에 관한 의사결정과정을 분석해 보기로 하겠다. 가격에 따라 전력수요가 변동되므로 각 발전사업자는 시장가격으로 전력량을 입찰해서 전력량을 많이 할당받는 데서 오는 이익과 그 반대로 해서 얻는 이익을 비교해서 의사 결정을 하게 되며, ISO는 시장가격에 의해 전력수요가 결정되므로 입찰 가격에 대한 규제를 할 필요는 없게 된다.

일반적인 시장에서는 재화의 생산량이 시장가격에 따라 탄력성을 갖게 되는데 전력수요도 마찬가지로 시장가격에 따라 결정되게 된다. 즉 시장수요(D_t)는 시간 t에서의 현물가격(ρ_t)에 따라 결정되며, 이 때 현물가격 ρ_t 는 단일 발전사업자 계통부하 전체를 감당할 수 없으므로 입찰한 가격 중 높은 가격으로 결정된다. 이 가격이 결정되면 주어진 수요에 대해 각 발전사업자는 자신의 이익을 극대화하는 전략을 정함으로써 Nash균형을 찾을 수 있게 된다[6,7]. 그러므로 시장가격에 따라 수요가 정해지고 각 발전사업자는 이 수요에 맞추어 자신의 전략을 수립하게 되므로 두 개의 발전사업자(발전사업자 A, 발전사업자 B)가 시장에 참가한다고 가정하면 두 사업자가 입찰하는 가격에 따라 다음과 같이 3가지의 경우를 생각할 수 있다. 즉 한쪽이 높은 경우, 다른 한쪽이 높은 경우, 그리고 동일한 경우이다.

- $\rho_A > \rho_B$
- $\rho_A < \rho_B$
- $\rho_A = \rho_B$

각 경우에 대해 발전사업자가 어떻게 최선의 대응전략을 세우게 되며 전략을 수정할 필요가 없는 균형점을 도출할 수 있게 되어 시장이 형성될 수 있는지 살펴보기로 한다.

3.1 Case 1 : $\rho_A > \rho_B$

이 경우는 A의 입찰가가 높으므로 시장가격 ρ_t 는 ρ_A 가 되며, 이 가격에 따른 시장 수요는 다음과 같이 된다.

$$D_t = D_0 - S\rho_A$$

발전사업자 B는 이 상황에서 자신이 이익을 극대화하는 최적의 발전량을 식 $\frac{\partial PF_B}{\partial P_B} = 0$ 으로부터 얻게 된다.

이 식에 의해 계산된 B의 최적 발전량은 $P_B = \frac{\rho_A - b_B}{2c_B}$ 이 된다. 현물시장에서의 가격이 A가 입찰한 가격으로 결정되고 이에 따른 시장수요가 정해진 상태에서 B의 발전량이 결정되므로, 발전사업자 A, B의 이익은 물론 각 사업자에게 할당되는 발전량을 알 수 있게 된다. 이것은 게임에서 발전사업자 A, B가 Nash균형을 찾을 수 있음을 의미한다. A가 할당받는 발전량은 B가 할당받은 량을 A가 입찰한 시장가격에 의해 결정되는 수요에서 뺀 나머지가 된다. 즉,

$$P_A = D_t - P_B = D_0 - S\rho_A - \frac{\rho_A - b_B}{2c_B}$$

그 다음, A의 이익을 극대화시키는 가격은 $\frac{\partial PF_A}{\partial \rho_A} = 0$ 으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_A = K \quad (1)$$

여기서,

$$K = \frac{2c_B^2(D_0 + Sb_A + 2D_0Sc_A) + c_B(b_A + b_B + 2c_A(Sb_B + D_0)) + c_A b_B}{4c_B^2(S + S^2c_A) + 2c_B(1 + 2Sc_A) + c_A}$$

이 결과들은 두 발전사업자가 자신들의 이익을 극대화하기 위한 전략이 되는데, B의 경우에서 보면 A보다 낮게 입찰가를 쓰고 A가 입찰하는 가격을 현물가격으로 놓고 수요를 계산한 후 자신의 최적 생산량을 정하면 된다. A의 경우는 최적입찰가를 (1)로부터 얻을 수 있게 된다. 하지만 가격을 무한정 높일 수 있는 것이 아니라, B가 할당받고 난 나머지 시장 수요가 양이 될 때까지의 제약조건이 붙는다. 이것이 음이 되면 A는 손해를 보게 되므로 여기서 입찰가의 상한을 결정할 수 있게 되며, 가격은 시장원리에 의해 결정되므로 ISO가 입찰가에 대한 별도의 규제를 할 필요가 없게 된다.

$$\begin{aligned} D_t - \frac{\rho_A - b_B}{2c_B} &\geq 0 \\ \rho_A &\leq \frac{2D_0c_B + b_B}{2Sc_B + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 발전사업자 A, B의 최선의 대응전략은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{A의 전략 : } & (\rho_A = K, D_t - \frac{\rho_A - b_B}{2c_B}) \\ & (\rho_B < \rho_A \leq \frac{2D_0c_B - b_B}{2Sc_B + 1}) \\ \text{B의 전략 : } & (\rho_B < \rho_A, \frac{\rho_A - b_B}{2c_B}) \end{aligned}$$

이렇게 발전사업자 A, B가 전략을 선택하게 되면 서로 전략을 수정할 필요가 없고 이 전략을 선택함으로써 서로에게 이익이 극대화되는 균형을 이루게 된다. 이 균형점을 도출해가는 과정은 아래 [그림 1]로 요약된다.

3.2 Case 2 : $\rho_B > \rho_A$

B의 입찰가가 높으므로 시장가격 ρ_t 는 ρ_B 가 되고, 이 가격에 따른 시장 수요는 Case 1과 같은 논리로 B가 입찰한 가격에 의해 결정된다.

$$D_t = D_0 - S\rho_B$$

Case 1. $\rho_A > \rho_B$

A : 입찰가격 결정

$$\frac{\partial PF_A}{\partial \rho_A} = 0, \rho_A = K$$



시장수요 결정

$$D_t = D_0 - S\rho_A$$



B : 시장가격 ρ_A 에 따른 최적생산량 결정

$$\frac{\partial PF_B}{\partial P_B} = 0$$

$$P_B = \frac{\rho_A - b_B}{2c_B}$$



상호 이익을 극대화하는 Nash균형 도출

$$\text{A의 전략 : } (\rho_A = K, D_t - \frac{\rho_A - b_B}{2c_B})$$

$$(\rho_B < \rho_A \leq \frac{2D_0c_B - b_B}{2Sc_B + 1})$$

$$\text{B의 전략 : } (\rho_B < \rho_A, \frac{\rho_A - b_B}{2c_B})$$

그림 1 균형점 도출과정

Fig. 1 Procedure for finding Nash equilibrium

이렇게 결정된 수요에 따라 발전사업자 A는 자신이 이익을 극대화하는 최적의 발전량을 $\frac{\partial PF_A}{\partial P_A} = 0$ 으로부터 얻을 수 있다. 이 식에 의해 계산된 A의 최적 발전량은 $P_A = \frac{\rho_B - b_A}{2c_A}$ 이 되며, A의 이익을 극대화시키는 가격은 $\frac{\partial PF_A}{\partial \rho_B} = 0$ 으로부터 구할 수 있다. 즉

$$\rho_B = K^* \quad (3)$$

여기서,

$$K^* = \frac{2c_A^2(D_0 + Sb_B + 2D_0Sc_B) + c_A(b_B + b_A + 2c_B(Sb_A + D_0)) + c_B b_A}{4c_A^2(S + S^2c_B) + 2c_A(1 + 2Sc_B) + c_B}$$

Case 1에서와 같은 계산과정을 거쳐, 다음과 같은 결과를 얻게 되며,

$$D_t - \frac{\rho_B - b_A}{2c_A} \geq 0$$

$$\rho_B \leq \frac{2D_0c_A - b_A}{2Sc_A + 1} \quad (4)$$

마지막으로 발전사업자 A, B의 최선의 대응전략은 다음과 같다

$$\text{A의 전략 : } (\rho_A < \rho_B, \frac{\rho_B - b_A}{2c_A})$$

$$B \text{의 전략} : (\rho_B = K, D_i - \frac{\rho_B - b_A}{2c_A})$$

$$(\rho_A < \rho_B \leq \frac{2D_0c_A - b_A}{2Sc_A + 1})$$

3.3 Case 3 : $\rho_A = \rho_B$

이 때는 일반적으로 균형점을 찾을 수 없게 된다. 같은 입찰가를 제시한 두 발전사업자 중 한 사업자는 입찰가를 변화시키지 않고 한 발전사업자가 입찰가를 소폭으로 낮추어 입찰할 경우 이익이 더 발생한다면 균형점은 존재하지 않게 된다.

그러면 먼저 전력시장에 참가한 발전사업자 A, B중 A가 소폭으로 입찰가를 낮출 경우를 생각해 보기로 한다. 이 경우 계통한계가격(SMP)이 B가 입찰한 가격으로 결정된다. 이에 따라 A는 B가 제시한 가격에 대한 자신의 이익을 극대화하는 발전량을 산정 할 수 있게 된다.

$$P_A = \frac{\rho_B - b_A}{2c_A} \text{ [MW]}$$

이렇게 발전량 입찰전략을 수정함으로써 B가 얻는 추가이익은 기존의 전략으로 얻게 되는 이익을 뺀 나머지가 된다.

$$PF_A(\rho_B, \frac{\rho_B - b_A}{2c_A}) - PF_A(\rho_B, \frac{1}{2} D_i)$$

$$= (\frac{\rho_B - b_A}{2c_A} - \frac{1}{2} D_i) \left\{ \rho_B - b_A - c_A (\frac{\rho_B - b_A}{2c_A} + \frac{1}{2} D_i) \right\}$$

$$= c_A (\frac{\rho_B - b_A}{2c_A} + \frac{1}{2} D_i)^2 > 0$$

즉, 결과를 보면 c_A 가 양수(+)이므로 발전사업자 A가 자신의 이익을 증가시킬 수 있는 전략이 존재하고, 마찬가지로 B 또한 전략을 수정하면 이익을 증가시킬 수 있게 되어 균형점을 찾을 수 없게 된다.

4. 사례 연구

지금까지 시장가격에 따른 두 발전사업자의 입찰전략을 살펴 보았다. 첫 번째와 두 번째 경우에 대해서는 균형점을 도출할 수 있음을 보였다. 가격을 같게 입찰한 경우는 두 발전사업자 모두 자신의 이익 극대화를 위해 전략을 수정할 근거가 생겨서 시장에서 균형점을 찾을 수 없게 되었다. 이번 절에서는 구체적인 사례에 대해 시장에 참가한 발전사업자가, 수요가 정해지지 않은 상태에서 균형전략을 도출해가는 과정을 설명해 보기로 한다. 두 발전사업자의 비용함수 계수는 다음과 같고 [표 1]에서 볼 수 있듯이 본 사례연구에서는 편의상 발전사업자가 A가 발전사업자 B보다 효율이 좋은 것으로 가정하였다.

표 1 발전기 비용함수 계수

Table 1 Coefficients of generator cost function

시장참가자	비용계수			발전량 한계	
	a_i [\$/h]	b_i [\$/MWh]	c_i [\$/MW ² h]	최소 [MW]	최대 [MW]
A 사업자	0	6.0	0.22	10	250
B 사업자	0	2.0	0.42	20	200

시장수요함수 $D_i = D_0 - S\rho_i$ 의 계수에 대한 정보는 지속적인 게임을 통해 시장참가자들에게 공개되는데 계수는 다음과 같다.

$$D_0 = 450$$

$$S = 1.5$$

4.1 Case 1 : $\rho_A > \rho_B$

발전사업자 A의 입찰가가 높은 경우이므로 현물가격은 $\rho_i = \rho_A$ 가 된다. 이 상황에서 발전사업자 A는 다음과 같이 (1)식에 의해 최적 입찰가를 결정할 수 있다.

$$\rho_A = 105.66$$

그리고 이익을 내기 위한 A의 입찰가는 (2)번식의 조건을 만족해야 한다.

$$\rho_A < 166$$

시장가격이 설정되면, 시장수요가 결정된다. 이에 따라 [그림 1]에서와 같이 발전사업자 B는 자신의 최적생산량을 결정하게 되며 발전사업자 A, B의 이익이 결정되며 균형점에 도달하게 된다. 그 값들을 아래에 표로 요약된다.

표 2 내쉬 균형점 및 A, B의 보수

Table 2 Nash equilibrium point and A, B's payoff

	A's best strategy	B's best strategy
ρ_A	105.66	.
P_B	.	123
P_A	169	.
D_i	292	
PF_A	16,834.36	
PF_B	6396	

발전사업자 A가 입찰한 가격(ρ_A)에 대한 발전사업자 B의 이익(PF_B)을 분석해보면 다음과 같은 이차식을 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$PF_B = \frac{1}{4c_A} (\rho_A - b_B)^2 - a_B$$

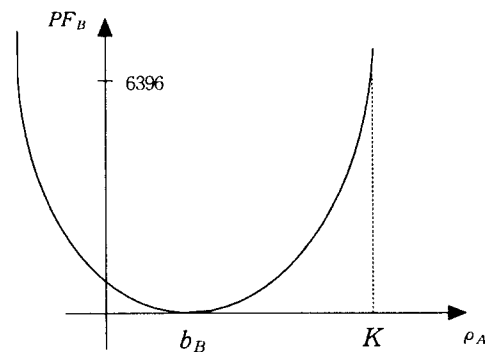


그림 2 ρ_A 에 대한 B의 이익곡선

Fig. 2 B's profit curve for ρ_A

마지막으로 산출된 결과치가 Nash 균형점이 되기 위해서는

사업자 A, B가 택한 전략을 수정했을 경우 보다 이 균형점을 택함으로써 얻는 이익이 커야 한다. 이를 확인하기 먼저 A가 가격을 10만큼 내려 입찰한 경우와 가격을 10만큼 높여 입찰한 경우에 얻는 A, B가 얻는 이익을 비교해 보기로 한다.

표 3 ρ_A 를 10만큼 내려 입찰한 경우
Table 3 The case that A decreases bidding price ρ_A by 10

	A's best strategy	B's best strategy
ρ_A	95.66	.
P_B	.	112
P_A	195	.
D_t	307	
PF_A	9118.2	
PF_B	5221.44	

A의 전략 \ B의 전략	(105.66, $D_t - P_B$)	(95.66, $D_t - P_B$)
($\rho_A > \rho_B, 123$)	(16834.36, 6396)	(9049.12, 4674)
($\rho_A > \rho_B, 112$)	(10810.8, 6341.44)	(9118.2, 5221.44)

이 경우는 입찰전략을 수정함으로써 얻는 이익보다 기존의 전략을 선택함으로써 얻는 이익이 더 큼을 확인할 수 있다. 따라서 시장에 Nash균형점이 존재하게 된다.

표 4 ρ_A 를 10만큼 높혀 입찰한 경우
Table 4 The case that A increases bidding price ρ_A by 10

	A's best strategy	B's best strategy
ρ_A	115.66	.
P_B	.	135
P_A	142	.
D_t	277	
PF_A	11135.64	
PF_B	7689.6	

A의 전략 \ B의 전략	(105.66, $D_t - P_B$)	(115.66, $D_t - P_B$)
($\rho_A > \rho_B, 123$)	(16834.36, 6396)	(11670.12, 7626)
($\rho_A > \rho_B, 135$)	(10223.84, 6339.6)	(11135.64, 7689.6)

A의 입찰가를 더 높일 경우는 시장에 균형점이 존재하지 않게 되어 바람직한 시장 디자인이 될 수 없게 된다.

위 두 개의 예를 종합해 보면 발전사업자 A, B가 기존에 설정한 전략을 수정할 이유가 없음을 알 수 있다. 즉, 처음 설정한 최선의 대응전략을 수정할 이유가 없어진다.

4.2 Case 2 : $\rho_A < \rho_B$

이 경우, 발전사업자 B의 입찰가가 높기 때문에 B의 입찰가가 시장가격이 되며, (3)식에 의해 최적입찰가를 산정할 수 있다.

$$\rho_B = 98.03$$

이 값은 (4)식에서 도출된 값보다 작아야 한다.

$$\rho_B < 116$$

사례연구 4-1에서와 마찬가지로 발전사업자 A, B에 최선의 전략과 이에 따른 이익을 아래 표로 요약할 수 있으며, 이것이 Nash 균형점임을 확인해 볼 수 있다.

표 5 내쉬 균형점 및 A, B의 보수
Table 5 Nash equilibrium point and A, B's payoff

	A's best strategy	B's best strategy
ρ_B	.	98.03
P_A	209	.
P_B	.	94
D_t	303	
PF_A	9,624.45	
PF_B	5,315.7	

5. 결론 및 향후연구과제

전력산업은 급속한 규제완화를 통해 완전경쟁체제로의 전환이 모색되고 있다. 시장경쟁의 논리의 적용은 전력시장에 참가한 시장참가자들의 이익 극대화라는 명백한 명제를 대두시킨다. 이 시점에서 보다 체계적인 의사 결정 수단으로서 상호의 이익을 극대화하는 한가지 수단으로서 게임이론이 적용될 수 있음을 본 논문의 사례연구를 통해서 보였다. 그리고 시장수요를 가격에 반응하도록 탄력성을 부여하여 실제 상황에 더욱 근접한 분석을 할 수 있었다.

하지만 완전한 경쟁체제가 확립된 상황에서도 게임이 무한 반복되는 게임을 통해 대략에 정보를 얻을 수 있지만, 시장참가자가 상대방 비용함수에 대한 완벽한 정보를 가지고 있거나 그리 쉬운 일이 아닐 것이다. 따라서 보다 더 실제상황과 일치하는 전력거래 해석을 위해서는 상대방 비용함수에 대한 정보가 완벽하지 않은 상태에서의 게임이론 적용을 위해 불완전정보인 상태를 가정하고 시장분석을 행하는 것이 더 실제의 전력시장에 근접한다고 할 수 있겠다. 따라서 향후 연구과제는 상대에 대한 개략적인 정보를 가진 불완전정보 상황에서의 게임을 통한 균형점 도출을 모색하는 방향으로 연구가 진행될 것이며, 동적게임이론(Dynamic Game Theory)[11,12]을 적용한 시장해석과 다수의 시장참가자가 있는 상황에서의 균형점 도출 등 이 또한 향후 연구에 추가될 것이다.

감사의 글

본 연구는 1999년 홍익대학교 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

참 고 문 헌

[1] Allen J. Wood and F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.

[2] P. F. Penner, *Electric Utility restructuring : A Guide to the Competitive Era*, Public Utilities Reports, Inc., Vienna, Virginia, 1997.

[3] F. Nishimura, R. D. Tabors, M. D. Ilic, and J. R. Lacalle-Melero, "Benefit Optimization of Centralized and Decentralized Power Systems in a Multi-Utility Environment", *IEEE Trans. on PWRs*, Vol. 8, No. 3, pp.1180-1186, Aug, 1993.

[4] Hugh Rudnick, Pioneering Electricity Reform in South America, *IEEE Spectrum*, pp. 38-44, Aug. 1996.

[5] R. W. Ferrero, S. M. Shahidehpour, and V. C. Ramesh, Transaction analysis in Deregulated Power Systems Using Game Theory, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 3, pp. 1340-1347, August 1997.

[6] Hal R. Varian, *Microeconomic Analysis 3rd edition*, W.W. Norton & Company, 1992.

[7] D. M. Kreps, *A Course in Microeconomic Theory*, Princeton University Press, 1990.

[8] A. Maeda and Y. Kaya, Game Theory Approach to Use of Non-Commercial Power Plants Under Time-Of-Use Pricing, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 1052-1059, August 1992.

[9] Peter B. Luh, Yu-Chi Ho, and R. Muralidharan, Load Adaptive pricing: An Emerging Tool for Electric Utilities, *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 27, No. 2, pp. 320-329, April 1982.

[10] R. W. Ferrero, S. M. Shahidehpour, and V. C. Ramesh, Transaction Analysis in Deregulated Power Systems Using Game Theory, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 3, pp. 1340-1347, August 1997.

[11] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*, Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1991.

[12] H.S. Bierman and L. Fernandez, *Game Theory with Economic Applications*, Addison-Wesley, 1998.

저 자 소 개



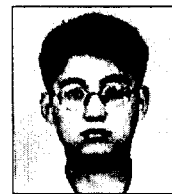
박 만 근 (朴 滿 根)
 1970년 7월 6일생. 1997년 홍익대 전기제어 공학과 졸업. 1998년 동 대학원 대학원 석사과정. 1997년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력거래소 시장운영팀 근무
 Tel : 02-3456-6026
 E-mail : parkmg@dava.kepco.co.kr



박 종 배 (朴 宗 培)
 1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 졸업(공학박). 1987년~1998년 한국전력공사 근무. 현재 안양대 전기전자공학과 조교수
 Tel : 0343-467-0968
 E-mail : jbaepark@aycc.anyang.ac.kr



김 발 호 (金 發 鎬)
 1962년 7월 12일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1984년~1990년 한국전력공사 기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992년 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학박). 1999년~현재 홍익대 전자전기제어공학부 조교수
 Tel : 02-320-1462, FAX : 02-320-1110
 E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr



정 만 호 (丁 萬 鎬)
 1972년 12월 13일생. 1995년 서울대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 졸업(석사). 1997~현재 한국전력공사 근무
 Tel : 02-562-6928
 E-mail : mambo@dava.kepco.co.kr