

Analysis of Price-Clearing in the Generation Bidding Competition

鄭求亨* · 姜東周** · 金發鎬*** · 全瑩煥***

(Chung, Koohyung · Kang, Dongjoo · Kim, Balho · Chun, Yeonghan)

Abstract - As deregulation evolves, pricing electricity becomes a major issue in the electric industry. Participants of competitive marketplace are able to improve their profits substantially by adequately pricing the electricity. In this paper, game theory is applied to analyze the price-clearing in the generation bidding competition and the competition is modeled as the noncooperative and complete information. The result of this analysis can be useful in understanding spot price-clearing of electricity and generating entity's strategic behavior in the competitive electricity market.

Key Words : Game theory, generation bidding competition, price clearing, strategic behavior, maximum capacity constraints

1. 서론

전통적인 수직통합체제에서의 급전계획은 계통수요를 충족 시키고 동시에 운전비용을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 각 발전기는 중앙에서 통제하며 비용과 운전제약에 대한 정보는 모든 계통참여자들이 공유한다. 따라서, 이와 같은 수직통합체제에서의 이익극대화는 비용최소화를 통해 얻을 수 있다[1,2]. 그러나, 수직통합체제를 유지해 오던 전력산업은 현재 규제완화된 시장 경쟁체제로 변화하고 있다. 따라서, 새로운 환경 하에서의 급전계획은 기존의 단일 운영자에 의해 결정되는 구조에서 시장에 참여하여 서로 경쟁하게 되는 다수의 의사결정주체들에 의해 결정되고 운영되는 구조로 재편되고 있다. 그 결과, 이러한 경쟁체제로 전환된 전력시장의 참여자들은 계통 관점에서의 비용최소화보다는 자신의 이익극대화를 추구하게 되기 때문에, 더 이상 계통 관점의 비용최소화가 각 참여자의 이익극대화를 의미하지 않게 된다 [3].

경쟁적 전력시장에서의 가격결정은 규제를 통해서가 아니라 시장참여자 간 상호작용을 통해 결정된다. 또한, 시장참여자의 이익은 더 이상 규제의 대상이 아니며, 전력가격이 어떻게 결정되는가에 따라 크게 좌우된다. 그러므로, 경쟁적 전력시장의 참여자들은 자신의 이익을 극대화할 수 있는 전력가격에 대한 최적의사결정 방법의 개발에 관심을 갖게 된다. 국가별로 다양한 구조개편 모형이 제안되고 또한 시도되

고 있지만, 이 가운데서도 가장 보편적인 모형은 PoolCo 모형의 전력시장구조이다. PoolCo 모형에서는 발전사업자들이 독립계통운영자(ISO)에게 가격과 발전량을 입찰하며, ISO는 발전사업자가 입찰한 가격과 발전량에 의해 형성된 공급곡선과 계통 수요곡선이 만나는 점에서 현물가격을 결정하여 시장을 청산한다. 따라서, 이러한 현물가격은 마지막으로 계통투입이 승인된 발전기의 입찰가격으로 결정되며, 계통투입이 승인된 모든 발전사업자들은 자신이 공급하는 발전량에 대해 동일한 청산가격(Market Clearing Price : MCP)으로 보상받게 된다[5].

이러한 PoolCo의 입찰에 참여하는 발전사업자의 목적은 PoolCo의 이익과는 상관없이 자신의 이익을 극대화하는 것이다. 발전사업자가 입찰을 통해서 자신의 이익을 극대화하기 위해서는 자신의 입찰가격과 발전량뿐만 아니라 상대의 입찰가격과 발전량 또한 고려하여 최적의 입찰전략을 수립해야 한다. 그러나, 입찰발전량의 조절이 결국 시장가격의 변동으로 이어지기는 하지만 이러한 가격변동은 2차적인 효과이며, 또한 각 발전사업자의 시장지배력이 비슷하게 형성되어 있는 전력시장에서는 입찰발전량 조절을 통한 경쟁효과는 미약하다고 할 수 있다. 따라서, 이와 같은 경우에는 각 발전사업자가 자신의 입찰가격 그 자체를 바로 전략적으로 활용하여 직접적으로 자신의 입찰가격을 조절함으로써 발전입찰경쟁에 참여하게 된다. 한편, 특정 발전사업자의 입찰용량이 제약되는 경우 즉, 시장지배력이 특정 발전사업자에게 편중되는 경우에는 또 다른 발전입찰경쟁의 결과를 도출할 수 있다. 시장지배력의 불균형이 발생한 상황에서는 이러한 제약조건을 이용하여 불공정한 거래전략을 행사할 가능성이 있으며, 이로 인해 전력가격을 왜곡하여 최종소비자가 막대한 비용지불을 초래할 수도 있다.

그러므로, 각각의 경우에 대한 전력가격 결정과정에 대한 분석은 매우 중요하며, 이를 위해서는 각 발전사업자의 입찰

* 正會員 : 弘益大學 電氣情報制御工學科 博士課程
 ** 正會員 : 韓國電氣研究院 研究員
 *** 正會員 : 弘益大學 電氣情報制御工學科 助教授 · 工博
 接受日字 : 2003年 2月 10日
 最終完了 : 2003年 11月 28日

경쟁에 대한 분석을 통해 전기에너지의 현물가격과 발전사업자의 전략적 행동에 대한 기본적이고 유용한 정보를 확보해야 할 것으로 판단된다. 이를 위해, 본 논문에서는 게임이론을 이용하여 발전사업자의 최적입찰전략을 통한 전력가격결정에 대한 분석을 수행하였다. 경쟁적 전력시장에서는 각 발전사업자가 상대와의 상호연관 관계를 통해 자신의 이익을 추구하고 있으나 어느 누구도 그 결과를 마음대로 좌우할 수 없는 게임상황으로 나타낼 수 있으므로, 발전사업자의 최적입찰전략 결정에 관한 행위는 게임이론을 통해 분석될 수 있다. 또한, 본 논문에서는 이와 같은 분석을 수행하기 위해, 발전입찰경쟁을 각 발전사업자의 비용함수를 포함한 모든 정보가 공개된 완비정보게임으로 구현하였다. 이는 다소 비현실적일 수 있으나, 각 발전사업자는 입찰경쟁을 반복할수록 상대의 정보를 보다 정확히 예측할 수 있으므로, 본 논문에서는 이러한 가정을 도입하여 각 발전사업자의 최적입찰전략 및 전력가격결정에 대한 분석을 수행하였다.

2. 발전입찰게임

PoolCo 모델에서, 발전사업자는 자신이 소유한 각 발전기에 대한 가격과 발전량을 입찰하며, 각 발전기의 입찰가격 및 발전량에 의해 형성된 공급곡선과 계통수요가 만드는 수요곡선이 만나는 점에서 현물가격이 형성된다. 이 현물가격은 가장 마지막으로 계통 투입이 승인된 발전기 즉, 한계발전기의 입찰가격으로 결정된다[2]. 그러므로, 발전사업자는 자신의 입찰가격과 발전량을 전력거래 게임의 전략(strategy)으로 사용할 수 있다. 그러나, 이익극대화의 목적 하에서는, 비계약급전 입찰경쟁에 참여하는 발전사업자의 입찰발전량은 현물가격 하에서 자신의 이익을 최대로 하는 값, 즉 해당 발전기의 한계비용이 현물가격과 일치하도록 하는 발전량이 되어야 하기 때문에[6], 실질적인 발전사업자의 전략은 자신의 입찰가격이 된다. 따라서, 전력거래 게임은 결과적으로 현물가격을 자신이 소유한 발전기의 입찰가격으로 할 것인가 아니면 상대 발전사업자의 발전기 입찰가격으로 할 것인가에 대한 게임으로 표현될 수 있다. 따라서, 발전입찰게임은 가격설정게임(price-setting game)으로 표현될 수 있으며, 입찰발전량의 결정은 이러한 가격설정의 부분조건(즉, 입찰발전량은 현물가격에 대한 종속변수)이 된다 할 수 있다. 실제로, 전력시장은 과점시장이며 과점시장에서는 각 발전사업자가 직접적으로 가격설정에 영향을 끼칠 수 있기 때문에, 발전입찰game을 가격설정game으로 표현하는 것이 보다 합리적이라 할 수 있다.

본 논문에서는 경쟁적 전력시장의 발전입찰경쟁을 분석하기 위해 다음과 같은 가정을 도입한다.

- 각 발전사업자는 합리적인 경기자이다. 즉, 각 발전사업자는 자신의 이익함수를 구성하며, 이러한 이익함수를 극대화하는 입찰전략을 선택하는 것에 대해서만 관심을 갖는다.
- 총 입찰발전량은 계통수요를 공급하는 데 충분한 양이어서, 시장에서는 전력부족 현상이 발생하지 않는다. 그러므로, 본 논문에서는 총 계통수요의 공급부족으로 인한 가격상승에 대한 경우는 고려하지 않는다.
- 동일한 계통수요 정보를 모든 발전사업자가 알고 있다.

실제로, TWBP 시장에서는 실제 급전일 이전에 예상 계통수요에 대한 정보를 발전사업자들에게 공지하므로 이 가정은 타당하다고 할 수 있다.

- 수요에 대한 가격탄력성은 고려하지 않는다. 즉, 수요입찰은 무시한다. 만약, 수요입찰을 반영하고자 한다면 계통수요에 대한 가격탄력성 함수를 고려하면 된다.
- 송전손실과 송전망 제약은 무시한다. 즉, 비계약급전 입찰에 대해서만 고려한다. TWBP 시장에서는 각 발전사업자가 비계약급전에 대한 입찰을 제출하며, ISO는 승인된 급전계획이 송전제약을 발생시킬 경우에는 송전제약으로 급전이 제한되는(constrained-off) 발전기에 대해 별도의 보상을 하게 된다.
- 각 발전기의 비용함수는 2차함수로 표현한다. 이는 각 발전기의 한계비용은 출력에 비례하여 변동함을 반영한 것으로, 상수의 한계비용을 이용하는 것은 잠재적으로 비현실적인 결과를 초래한다[14].
- 시장에 참여한 발전사업자의 비용함수에 대한 정보를 포함한 모든 정보가 공개된다. 이는 입찰이 무한반복되어 발전사업자들이 상대의 비용함수에 대한 정보를 정확하게 추정할 수 있음을 가정하며, 발전입찰경쟁을 완전정보게임으로 구현하는 것을 목적으로 한다[6]. 물론, 이러한 가정은 다소 비현실적일 수 있으나, 본 논문은 발전사업자 간 비계약급전 입찰경쟁에서 현물가격이 결정되는 과정을 분석하는 것이기 때문에 완비정보game을 채택하였다.
- 각 발전기의 공급곡선은 연속(continuous)이라고 가정한다. 즉, 각 발전기는 하나의 [가격, 공급량] 입찰 집합을 제출하는 것으로 가정한다. 모든 정보가 공개된 완비정보게임의 가정 하에서는 상대의 전략선택에 대한 예상도 공개되는 것으로 볼 수 있기 때문에, 다수의 [가격, 공급량] 입찰집합을 제출한다고 하더라도 결국은 각 발전사업자가 확실하게 달성할 수 있는 하나의 [가격, 공급량] 입찰집합을 제출하여 경쟁하는 경우와 같은 결과를 유도하게 된다.

3. 발전입찰전략 분석

위에서 언급한 바와 같이, 각 발전기의 최적입찰발전량은 발전사업자가 예상하는 현물가격과 해당 발전기의 한계비용이 일치할 때의 발전량이 된다. 따라서, 각 발전사업자는 현물가격을 어떤 참여자의 입찰가격으로 설정하도록 할 것인가에 대한 선택을 자신의 입찰전략으로 고려할 수 있다. 본 논문에서는 우선, 각각 1대의 발전기를 소유하는 두 발전사업자가 입찰에 참여하는 경우에 대해 분석한 다음, 이를 일반적인 경우로 확장하고자 한다.

3.1 가격수용자의 최적입찰발전량 계산

본 논문에서는 참고문헌 [6]과 동일한 방법으로, 각 발전사업자가 가격을 수용할 경우의 최적입찰발전량 계산식을 도입한다. 즉, 임의의 발전기 G_i 의 비용함수를 다음과 같은 2차식으로 표현하며,

$$C_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (1)$$

해당 입찰주기의 현물가격이 λ_i 일 경우, 발전량 P_i 를 계통에 공급하는 발전기 G_i 의 보수함수 즉, 이익함수는 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} \pi_i(\lambda_i, P_i) &= \lambda_i P_i - C_i(P_i) \\ &= \lambda_i P_i - (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \end{aligned} \quad (2)$$

단,

- P_i : 발전기 G_i 의 발전량
- a_i, b_i, c_i : 발전기 G_i 의 (음이 아닌) 비용함수 계수
- λ_i : 입찰주기 t 에서의 공급전력에 대한 현물가격
- $\pi_i(\lambda_i, P_i)$: 발전기 G_i 의 이익함수.

따라서, 식 (2)의 이익함수값을 극대화하는 발전량은 다음과 같이 이익함수에 대한 1차 미분조건(first-order necessary condition) $\partial \pi_i / \partial P_i = 0$ 을 만족하는 발전량이 된다. 즉,

$$P_i^* = \frac{\lambda_i - b_i}{2c_i} \quad (3)$$

그러므로, 현물가격 λ_i 를 예상하는 각 발전사업자는 식 (3)에 의해 각 발전기의 최적입찰 발전량을 결정할 수 있으며, 이익극대화를 목적으로 하는 발전사업자는 자신의 이익이 현물가격 λ_i 의 값에 따라 좌우됨을 알 수 있다. 그러므로, 각 발전사업자의 실질적인 입찰전략은 현물가격 λ_i 를 어떻게 설정할 것인가 - 즉, 누구의 입찰가격으로 설정할 것인가 - 에 대한 결정이 된다고 할 수 있다.

3.2 가격설정자의 최적입찰가격 분석

두 발전사업자는 자신의 전략으로써 다음과 같은 두 가지 경우를 고려하게 된다.

- 자신이 소유한 발전기의 입찰가격으로 현물가격을 설정할 것인가?
- 그렇지 않으면, 상대 발전사업자의 입찰가격으로 현물가격을 결정할 것인가?

즉, 발전사업자는 어느 발전사업자의 입찰가격이 현물가격이 되어야 자신의 이익을 극대화할 수 있는지에 대해 고려해야 하며, 이에 따라 자신이 가격설정자(price-setter)가 될 것인가 아니면 가격수용자(price-taker)가 될 것인가를 결정한다. 따라서, 발전입찰게임은 어느 발전사업자의 입찰가격을 현물가격으로 설정할 것인가를 결정하는 게임으로 모델링 될 수 있다.

입찰의 발전사업자 A 는 자신의 입찰가격이 현물가격이 될 것으로 예상하는 경우, 즉 자신이 가격설정자가 될 것으로 예상하는 경우, 상대 발전사업자 B 즉, 가격수용자는 자신의 입찰가격보다 낮은 가격과 위에서 언급한 최적입찰발전량을 자신의 입찰전략으로 선택할 것임을 예상할 수 있으며, 이 입찰에서 자신에게 할당되는 투입승인 발전량은 총 계통수요량에서 상대의 입찰발전량을 뺀 나머지가 됨을 예상할 수 있다. 따라서, 발전사업자 A 에게 할당되는 투입승인 발전량은 다음과 같다:

$$G_A = D_t - G_B \quad (4)$$

단,

- D_t : 입찰주기 t 에서의 총 계통수요량
- G_B : 발전사업자 B 의 투입승인 발전량.

따라서, 가격설정자 A 의 이익함수는 다음과 같이 결정된다.

$$\pi_A(\lambda_A, P_A) = \lambda_A D_t - \lambda_i P_B^*(\lambda_A) - C_A(D_t - P_B^*(\lambda_A)) \quad (5)$$

단, $P_B^*(\lambda_A)$ 은 현물가격을 λ_A 로 예상하는 발전사업자 B 의 최적입찰발전량 함수를 의미한다.

가격설정자 A 는 상대의 입찰발전량을 고려하여 자신의 이익을 극대화하는 가격으로 입찰하게 되므로, 발전사업자 A 의 최적입찰가격 λ_A^* 은 다음과 같은 일차미분조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_A(\lambda_A)}{\partial \lambda_A} &= D_t - \left[\lambda_A \frac{\partial P_B(\lambda_A)}{\partial \lambda_A} + P_B(\lambda_A) \right] \\ &\quad - \left[\frac{\partial P_B(\lambda_A)}{\partial \lambda_A} \frac{\partial C_A(D_t - P_B(\lambda_A))}{\partial P_B(\lambda_A)} \right] = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (2)와 식 (3)를 대입하여 정리하면 다음과 같은 최적 입찰가격 λ_A^* 을 얻을 수 있다.

$$\lambda_A^* = \frac{b_B c_B + b_A c_B + 2c_A c_B D_t + b_{BCA} + 2c_B^2 D_t}{2c_B + c_A} \quad (7)$$

발전입찰게임은 모든 게임참여자에 대해 대칭(symmetric)이므로, 발전사업자 B 도 이와 같은 방법으로 자신이 가격설정자가 될 경우의 최적입찰가격을 얻을 수 있다.

$$\lambda_B^* = \frac{b_A c_A + b_B c_A + 2c_A c_B D_t + b_{ACB} + 2c_A^2 D_t}{2c_A + c_B} \quad (8)$$

3.3 최적입찰전략의 결정

이제 각 발전사업자는 입찰주기 t 에서의 발전입찰게임에 대하여, 두 개의 후보현물가격 즉, 각 발전사업자 A 와 B 의 최적입찰가격을 얻을 수 있다. 다시 말하면, 각 발전사업자는 선택가능한 무한개의 입찰가격 즉, 무한개의 입찰전략 가운데 위에서 언급한 두 개의 후보현물가격을 자신의 후보전략으로 축소시킬 수 있다. 따라서, 각 발전사업자의 전략집합은 $S_A = S_B = \{\lambda_A^*, \lambda_B^*\}$ 로 표현할 수 있다.

각 발전사업자는 자신의 전략집합 내 후보현물가격 가운데 자신에게 유리한 가격을 선호하게 되고, 이 때 각 발전사업자가 선호하는 현물가격이 일치한다면, 즉 $\pi_A(\lambda_A^*) > \pi_A(\lambda_B^*)$ 이고 $\pi_B(\lambda_A^*) > \pi_B(\lambda_B^*)$ 이면 또는 $\pi_A(\lambda_B^*) > \pi_A(\lambda_A^*)$ 이고 $\pi_B(\lambda_B^*) > \pi_B(\lambda_A^*)$ 이면, 현물가격은 각각 λ_A^* 또는 λ_B^* 로 결정된다.

그러나, 각 발전사업자가 선호하는 현물가격이 일치하지 않는 경우, 즉 두 발전사업자 모두 자신이 가격수용자가 되거나 가격설정자가 되는 것을 선호할 경우, 자신과 상대의 입찰전략에 대해 보다 자세한 분석을 필요로 한다.

3.3.1 가격수용경쟁

위에서 언급한 전략집합에 대해, 두 발전사업자가 모두 상대의 최적입찰가격에 대한 가격수용자가 될 때 보다 더 많은 이익을 얻을 수 있는 경우를 가격수용경쟁(price-taking competition)이라 한다. 따라서, 가격수용경쟁이 발생할 경우 각 발전사업자는 상대보다 낮은 가격을 입찰하여 가격을 수용함으로써 자신의 이익을 극대화할 수 있다. 이러한 가격수용경쟁은 차최고가 경매게임과 유사한 규칙을 갖는다. 차최고가 경매에서의 낙찰자는 자신이 입찰한 가격이 아니라 자신을 제외한 다른 입찰자의 입찰가격 가운데 최고가격으로 경매물건에 대한 비용을 지불한다. 이와 유사하게, 가격수용경쟁에서 이긴 발전사업자는 자신이 입찰한 가격이 아니라 자신을 제외한 다른 발전사업자의 입찰가격 가운데 최고가격으로 보상받는다. 이와 같은 가격수용경쟁 즉, 차최고가 규칙 하에서의 발전사업자의 최적전략은 자신의 실제비용으로 입찰하는 것이다[12]. 따라서, 가격수용경쟁에서 이기고자 하는 발전사업자의 최적전략은 자신의 실제비용 즉, 최적입찰발전량에 대해 0의 이익을 얻게 되는 가격으로 입찰하는 것이다. 이 때, 발전입찰 시 가격은 MW당 가격으로 입찰하며 또한 발전출력에 대한 2차식으로 표현되는 발전사업자의 총 발전비용은 자신의 발전출력에 대해 비선형으로 증감하므로 발전사업자의 실제비용은 자신의 최적입찰발전량에서의 MW당 발전비용으로 보는 것이 합리적이다.

식 (7)과 (8)에 기술된 상대의 최적입찰가격 하에서의 각 발전사업자의 MW당 발전비용을 $UC_A(\lambda_A^*)$ 라고 하면, 각 발전사업자의 MW당 비용은 다음과 같이 계산된다.

$$UC_A(\lambda_B^*) = \frac{C_A(P_A^*)}{P_A^*}$$

$$UC_B(\lambda_A^*) = \frac{C_B(P_B^*)}{P_B^*}$$

여기에 자신의 최적입찰발전량에 대한 식 (3)을 대입하여 정리하면, 각 발전사업자의 MW당 발전비용은 다음과 같이 계산된다.

$$UC_A(\lambda_B^*) = \frac{(\lambda_B^*)^2 - b_A^2 + 4a_A C_A}{2(\lambda_B^* - b_A)} \quad (9)$$

$$UC_B(\lambda_A^*) = \frac{(\lambda_A^*)^2 - b_B^2 + 4a_B C_B}{2(\lambda_A^* - b_B)} \quad (10)$$

$UC_A(\lambda_B^*) < UC_B(\lambda_A^*)$ 라고 하면, 발전사업자 A는 자신의 MW당 비용 $UC_A(\lambda_B^*)$ 으로 입찰하여 자신이 가격수용자가 되리라 할 것이다. 이 때, 자신이 가격수용자일 경우의 단위 발전비용이 상대보다 더 높을 것으로 예상하는 발전사업자 B는 상대의 단위 발전비용 $UC_A(\lambda_B^*)$ 보다 더 낮은 가격으로 입찰할 때의 이익(발전사업자 A의 단위 발전비용 $UC_A(\lambda_B^*)$ 으로 가격을 설정할 때의 이익)과 자신이 가격을 설정할 때의 최대이익(자신이 현물가격을 λ_B^* 로 설정할 때의 이익)을 비교할 수 있다. 만약, 자신이 가격을 설정할 때의 이익이 더 큰 것으로 판단되면, 발전사업자 B는 가격설정자로서 가격 λ_B^* 를 입찰하여 자신의 이익을 극대화한다. 가격설정자 B는 $UC_A(\lambda_B^*)$ 보다 높은 어떠한 가격도 입찰할 수 있지만,

자신이 가격을 설정할 경우 최대이익을 보장하는 가격이 λ_B^* 임을 알고 있으므로 이 가격을 자신의 최적전략으로 선택하게 되며, 이 발전입찰게임은 현물가격 λ_B^* 에서 균형을 이루게 된다.

이와 달리, 상대의 단위 발전비용 $UC_A(\lambda_B^*)$ 보다 더 낮은 가격으로 입찰할 때의 이익이 자신이 가격을 설정할 때의 최대이익보다 큰 것으로 판단되면 즉, 현물가격이 λ_B^* 일 때보다 $UC_A(\lambda_B^*)$ 일 때 자신의 이익이 증가하는 것으로 판단되면, 발전사업자 B는 $UC_A(\lambda_B^*)$ 보다 낮은 가격으로 입찰하는 것으로 자신의 전략을 수정하고자 할 것이다. 이를 예상하는 발전사업자 A는 다시 자신이 가격을 수용할 경우의 이익과 가격을 설정할 경우의 이익을 비교하여 보다 많은 이익을 얻을 수 있는 전략을 선택한다. 이와 같은 과정을 반복하여 자신이 가격을 설정하는 것이 더 나은 것으로 판단되는 발전사업자는 결국 가격설정 시 최대이익을 보장하는 가격 λ_i^* (단, $i=A$ or B)로 입찰하며, 이를 예상하는 가격수용자는 자신의 발전량을 $P_j(\lambda_i)$ (단, $j=A$ or B 이고 $j \neq i$)로 결정한다.

발전입찰게임은 모든 게임참여자에 대해 대칭(symmetric)이므로, $UC_A(\lambda_B^*) > UC_B(\lambda_A^*)$ 인 경우에도 위와 같은 방법으로 균형을 얻을 수 있다.

3.3.2 가격설정경쟁

각 발전사업자의 전략집합에 대하여, 발전사업자들이 자신이 가격설정자가 될 때 보다 더 많은 이익을 얻게 되어, 자신의 입찰가격으로 가격을 설정하려고 경쟁하는 경우를 가격설정경쟁(price-setting competition)이라 한다. 이와 같은 가격설정경쟁은 최고가격 경매게임과 유사한 규칙을 갖는다. 최고가격 경매에서의 낙찰자는 자신이 입찰한 가격으로 경매물건에 대한 비용을 지불한다. 가격설정경쟁에서 이긴 발전사업자 즉, 가격설정자 또한 자신이 입찰한 가격으로 보상받게 되므로, 가격설정경쟁과 최고가격 경매게임의 규칙은 매우 유사하다고 할 수 있다.

자신이 가격을 설정하고자 하는 각 발전사업자는 식 (7)과 (8)의 가격설정 시 최적입찰가격으로 입찰하고자 할 것이다. 만약 $\lambda_A^* > \lambda_B^*$ 라고 하면, 발전사업자 A는 λ_A^* 를 입찰하여 자신이 가격을 설정한다. 이를 예상하는 발전사업자 B는 λ_A^* 보다 높은 임의의 가격으로 입찰할 경우 자신의 이익이 증가할 수 있는지를 판단할 수 있다. 단, 각 발전사업자는 상대 즉, 가격수용자가 자신의 입찰발전량을 가격설정자가 입찰한 가격에 따라 식 (3)에서 언급한 바와 같이 수정할 것을 예상한다.

이 때, 발전사업자 B는 자신이 λ_A^* 보다 높은 가격으로 입찰할 경우 이익을 증가시킬 수 없다고 판단되면, 상대의 최적입찰가격 λ_A^* 에 대하여 자신의 이익을 극대화하기 위해 식 (4)에 의해 자신의 최적발전량을 결정한다. 만약 λ_A^* 보다 높은 가격으로 입찰할 경우 자신의 이익을 증가시킬 수 있다고 판단되면, 발전사업자 B는 자신이 가격설정자가 되기 위해 λ_A^* 보다 높은 임의의 가격 $\lambda_B^*(>\lambda_A^*)$ 으로 입찰하는 전략으로

수정할 것이다. 이를 예상하는 발전사업자 A는 λ_B 보다 높은 가격으로 입찰할 경우의 자신의 이익이 증가하는 지 여부를 판단하고자 할 것이며, 이익이 증가하지 않을 것으로 판단되는 경우에는 식 (3)을 이용하여 가격수용자로서 현물가격이 λ_B 일 때 자신의 이익을 극대화할 수 있는 최적입찰발전량을 결정한다. 만약 이익이 증가하는 것으로 판단되는 경우에는 다시 자신의 가격설정전략을 수정한다. 이와 같은 과정을 반복함으로써, 최종적으로 가격설정자를 결정할 수 있으며, 이 때의 가격설정자의 입찰가격이 해당 입찰주기에서의 현물가격이 된다. 또한, 자신이 가격수용자가 될 것으로 예상하는 발전사업자는 해당 현물가격에서 자신의 이익을 극대화할 수 있는 최적입찰발전량을 선택하게 된다.

발전입찰게임은 모든 게임참여자에 대해 대칭(sym-metric)이므로, $\lambda_B^* > \lambda_A^*$ 인 경우에도 위와 같은 방법으로 균형을 얻을 수 있다.

3.4 균형전략에 대한 분석

이제 가격수용경쟁과 가격설정경쟁 두 가지 경우에 대해, 어느 발전사업자가 더 유리한 위치에서 게임에 참여하는가를 분석하고자 한다. 가격수용경쟁의 경우에는 상대의 최적입찰가격에 대한 자신의 최적입찰발전량을 공급할 때의 공급비용이 보다 낮은 발전사업자가 더 유리한 입장에서 게임에 참여하게 된다. 식 (9)와 (10)을 보면, 만약 두 발전사업자의 비용함수가 유사하다고 가정할 경우, 각 발전사업자의 MW당 공급비용은 자신이 예상하는 현물가격에 좌우되며, 보다 낮은 현물가격 즉, 상대의 최적입찰가격을 예상하는 참여자의 발전비용이 더 작게 됨을 알 수 있다. 다시 말하면, 이와 같은 가격수용경쟁에서는 결국 자신이 가격설정자가 될 경우 상대보다 높은 최적입찰가격을 얻는 발전사업자가 보다 유리한 입장에서 게임에 참여하게 된다. 그 결과, 가격수용경쟁이 발생하는 발전입찰게임에서는 현물가격이 낮아지는 유인이 존재한다.

가격설정경쟁 시에도 이와 동일한 결과를 얻는다. 가격설정경쟁 시에는 각 발전사업자가 자신이 가격설정자가 되고자 하며, 이 때 보다 높은 최적입찰가격을 갖는 참여자가 가격설정에서의 우선권을 갖게 된다. 따라서, 보다 낮은 최적입찰가격을 갖는 발전사업자는 상대의 입찰가격에 대해 자신의 가격을 높게 또는 낮게 입찰할 때의 이익을 비교하여 자신의 전략을 선택하게 된다. 단, 가격설정경쟁이 발생하는 발전입찰게임에서는 현물가격이 상승하는 유인이 존재한다.

결과적으로, 각 발전사업자의 이익을 극대화하는 현물가격에 대한 예상이 일치하지 않는 경우에는 자신이 가격을 설정할 때의 최적입찰가격이 높은 참여자가 보다 유리하다고 할 수 있다. 위의 예에서, 발전사업자 A의 가격설정 시 최적입찰가격이 발전사업자 B의 최적입찰가격보다 더 높다고 가정하면 즉, $\lambda_A^* > \lambda_B^*$ 라고 한다면 여기에 식 (7)과 (8)를 대입하여 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\lambda_A^* > \lambda_B^*$$

$$\frac{b_{BCB} + b_{ACB} + 2c_{ACB}D_i + b_{BCA} + 2c_B^2D_i}{2c_B + c_A}$$

$$> \frac{b_{ACA} + b_{BCA} + 2c_{ACB}D_i + b_{ACB} + 2c_A^2D_i}{2c_A + c_B}$$

$$b_B + 2c_B D_i > b_A + 2c_A D_i$$

그러므로,

$$MC_B(D_i) > MC_A(D_i) \tag{11}$$

단, $MC_i(D_i)$ 는 발전기 G_i 가 D_i 의 출력을 발전할 때의 한계 발전비용을 의미한다.

따라서, 식 (11)의 결과를 통해, 해당 입찰주기 t 에서의 계통수요에 대한 한계 발전비용이 낮은 발전사업자가, 특히 각 발전사업자의 현물가격에 대한 예상이 일치하지 않는 경우, 보다 유리한 위치에서 발전입찰게임에 참여한다고 할 수 있다.

또한, 이러한 발전입찰경쟁으로 인해 각 발전사업자의 입찰가격을 규제하지 않아도 즉, 입찰가격 상한(price-cap)을 설정하지 않더라도 현물가격은 무한정 상승하지 않고 합리적인 수준에서 결정됨을 확인할 수 있다. 이는 각 발전사업자가 자신의 입찰전략을 결정할 때 상대의 입찰전략을 동시에 고려해야 하기 때문이다.

3.5 N명의 발전사업자가 입찰에 참여하는 경우

위에서 기술한 발전입찰게임은 다수의 발전기를 소유하는 N명의 발전사업자가 참여하는 게임으로 확장시킬 수 있다. 실제로, 각 발전사업자는 다수의 발전기를 소유하며 또한 입찰에 참여하는 발전사업자는 2인 이상인 경우가 일반적이다.

이와 같은 경우, 임의의 입찰주기 t 에서 자신이 가격설정자가 될 것을 예상하는 발전사업자 i 의 최적입찰가격은 다음과 같이 자신이 소유하고 있는 특정 발전기 즉, 한계발전기에 대한 최적화문제의 해가 된다.

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{\lambda_{i, \text{mag}}^t} \sum_{m=1}^M \pi_{im}(\lambda_{i, \text{mag}}^t) \\ \text{s. t. } & P_{i, \text{mag}}^t = D^t - \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{M_j} P_{jm}^t - \sum_{m=1}^{M_i-1} P_{im}^t \\ & P_{im}^{\min} \leq P_{im}^t \leq P_{im}^{\max} \\ & P_{im}^{t-1} - \Delta P_{im} \leq P_{im}^t \leq P_{im}^{t-1} + \Delta P_{im} \end{aligned} \tag{13}$$

단,

$\lambda_{i, \text{mag}}^t$: 발전사업자 i 의 한계발전기의 입찰가격

$P_{i, \text{mag}}^t$: 발전사업자 i 의 한계발전기의 발전량

M_i : 발전사업자 i 가 소유하고 있는 발전기 수

N : 입찰에 참여하는 발전사업자의 수.

식 (13)의 첫 번째 제약식은 입찰주기 t 에서의 수급균형 제약이며, 두 번째 제약식은 각 발전기에 대한 최대/최소출력 제약이다. 또한, 세 번째 제약식은 각 발전기의 증/감발률 제약을 의미한다.

식 (13)을 통해, 각 발전사업자의 한계발전기에 대해 가격설정 시 최적입찰가격을 구할 수 있으며 따라서, 입찰주기 t 에서의 입찰게임에 대해 N개의 후보입찰가격을 얻을 수 있다. 각각의 후보입찰가격에 대하여, 자신이 가격설정자가 되는 것을 선호하는 단 한 명의 발전사업자가 존재한다면, 이

가격이 해당 입찰주기에서의 현물가격 즉, 해당 입찰주기에서의 균형가격으로 결정된다. 이와 같은 경우, 가격수용을 신호하는 발전사업자들은 식 (4)를 이용하여, 가격설정경쟁을 통해 결정되는 가격 즉, 예상현물가격에 대한 각 발전기의 최적발전량을 입찰한다.

그러나, 발전입찰게임에서 가격설정경쟁이 발생하는 경우 이는, 위에서 설명한 바와 같이, 가격설정경쟁에 참여하는 각 발전사업자의 한계발전기 가운데 가장 높은 입찰가격을 제시한 발전기, 다시 말하면, 해당 입찰주기의 계통수요에 대해 가장 낮은 한계비용을 갖는 한계발전기를 갖는 발전사업자가 가장 유리한 위치에서 게임에 참여하게 된다.

가격수용경쟁만 존재하는 경우에도 이와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 즉, 다수의 발전사업자가 참여하는 발전입찰게임에 가격수용경쟁이 발생하게 되면, 결과적으로 해당 입찰주기의 계통수요에 대한 한계비용이 가장 낮은 한계발전기를 갖는 발전사업자가 이러한 가격수용경쟁에서 보다 유리하다.

4. 용량제약 하에서의 전력가격 결정

앞에서 기술한 결과를 바탕으로 임의의 발전사업자의 용량이 제약되는 경우 즉, 특정 발전사업자에게 시장지배력이 집중되는 경우, 전력의 현물가격이 어떻게 결정되는가를 간략하게 분석해 보고자 한다

4.1 가격수용자의 입찰발전량이 제약되는 경우

위의 식 (3)에서 보여주고 있는 바와 같이, 가격수용자(한계비용이 낮은 발전사업자) A의 최적입찰발전량은 자신의 한계발전비용이 가격설정자(한계비용이 높은 발전사업자) B의 입찰가격과 같게 될 때의 발전출력이 된다. 그러나, 가격수용자 A의 최대발전용량(P_A^{max})이 이러한 최적입찰발전량(P_A^*)보다 작다면 즉, 입찰발전량이 최대발전용량에 의해 제약받을 때 전술한 가격수용자의 최적입찰전략은 변경되어야 한다.

따라서, 이를 예상하는 가격설정자 B는 최소한 계통수요(D_t)에서 가격수용자 A의 최대발전량을 뺀 것만큼의 공급량을 확보하게 된다. 즉, 가격설정자 B의 최소입찰발전량 $\min\{P_B^{bid}\}$ 은 다음과 같다.

$$\min\{P_B^{bid}\} = D_t - P_A^{max} \quad (14)$$

그러므로, 자신의 입찰량이 최소한 (14)식과 같이 고정될 것으로 예상하는 가격설정자 B는 자신의 이익을 증가시키기 위해 입찰가격을 높이고자 하는 유인을 갖게 된다. 즉, 다음과 같은 가격설정자 B의 이익함수에 대해

$$\begin{aligned} \pi_B(\lambda_B, P_B) &= \lambda_B P_B - C_B(P_B) \\ &= \lambda_B P_B - (a_B + b_B P_B + c_B P_B^2) \end{aligned}$$

자신의 입찰량 P_B 가 최소입찰발전량으로 고정된다면, 결국 가격설정자 B의 이익은 자신의 입찰가격 λ_B 에 비례하여 증가하게 된다. 따라서, 가격설정자 B는 입찰상한(price-cap)까지 발전입찰가격을 높임으로써 자신의 이익을 증가시키고자 하는 유인을 갖게 됨을 알 수 있다.

따라서, 가격수용자 A는 가격설정자 B가 가격상한까지 자신의 입찰가격을 증가시키고자 함을 알고 있으므로 가격상한에서 현물가격이 결정될 경우, 자신의 이익을 극대화할 수 있는 입찰발전량을 결정해야 한다. 다음과 같은 가격수용자 A의 이익함수에 대해

$$\begin{aligned} \pi_A(\lambda_B, P_A) &= \lambda_B P_A - C_A(P_A) \\ &= \lambda_B P_A - (a_A + b_A P_A + c_A P_A^2) \end{aligned}$$

발전출력에 대한 한계이익은

$$\frac{\partial \pi_A}{\partial P_A} = \lambda_B - b_A - 2c_A P_A$$

이 된다. 이때, 현물가격 λ_B 가 가격상한으로 고정되었다면, 가격수용자 A의 한계이익이 발전출력에 비례하여 감소하므로, 총이익은 한계이익이 0이 될 때까지 발전출력에 비례하여 증가하게 된다. 한계이익이 0이 될 때의 출력이 가격수용자의 이익을 극대화하는 최적입찰발전량이지만, 최대발전용량이 이러한 최적입찰발전량보다 작기 때문에 가격수용자는 최대발전용량으로 입찰해야만 자신의 이익을 극대화할 수 있다.

결과적으로, 가격수용자의 입찰발전량이 자신의 최대발전용량에 의해 제약되는 경우, 이익극대화를 목적으로 하는 가격수용자는 최대발전용량까지 입찰하고자 하며 이를 예상하는 가격설정자는 자신의 고정된 입찰발전량($P_B^{bid} = D_t - P_A^{max}$)에 대한 이익을 극대화하기 위해 입찰가격을 가격상한까지 높임으로써 자신의 이익을 향상시키고자 한다.

4.2 가격설정자의 입찰발전량이 제약되는 경우

전술한 바와 같이, 발전입찰게임에서 가격설정자 B는 식 (5)의 입찰발전량과 식 (9)의 입찰가격을 자신의 최적입찰전략으로 선택한다. 이 때, 가격설정자 B의 용량이 제약된다면 즉, 자신의 최대발전량(P_B^{max})이 입찰발전량($P_B^{bid} = D_t - P_A$)보다 작다면 이러한 입찰전략을 자신의 최적입찰전략으로 선택할 수 없다. 따라서, 이를 예상하는 가격수용자 A는 자신의 입찰발전량을 증가하여 상대의 입찰가격을 높이고자 하는 유인을 갖는다. 가격수용자 A의 최적입찰발전량에 대한 식 (4)를 현물가격 즉, 가격설정자 B의 입찰가격에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda_B = b_A + 2c_A P_A$$

이 식을 통해 가격수용자의 입찰발전량과 가격수용자의 입찰가격은 비례함을 알 수 있다. 이는 가격수용자의 발전출력(P_A) 증가는 곧 가격설정자의 발전출력($P_B = D_t - P_A$)의 감소를 의미하므로, 가격설정자가 자신의 출력감소로 인한 이익감소를 보상하기 위해서는 결국 입찰가격을 높여야 하기 때문이다.

따라서, 가격수용자 A는 자신의 입찰발전량을 증가함으로써 가격설정자 B가 자신의 입찰가격(즉, 현물가격)을 상승시키도록 유도할 수 있으며, 이로 인해 자신의 이익을 증가시킬 수 있다. 즉, 가격수용자 A가 자신의 입찰량을 증가시킬 것으로 예상하는 가격설정자 B는 결국 자신의 입찰가

격(λ_B)를 증가하여야만 감소된 발전량에 따른 이익감소를 보충할 수 있으므로, 다음과 같은 가격설정자 B 의 이익함수에 대해

$$\begin{aligned} \pi_B(\lambda_B, P_B) &= \lambda_B P_B - C_B(P_B) \\ &= \lambda_B P_B - (a_B + b_B P_B + c_B P_B^2) \end{aligned}$$

자신의 출력감소로 인한 수입감소분($=\lambda_B \Delta P_B$)이 이로 인한 발전비용 감소분($=a_B + b_B \Delta P_B + c_B \Delta P_B^2$)보다 크다고 한다면, 가격설정자 B 는 자신의 입찰가격을 증가시키고자 하는 유인을 갖게 되며, 그 결과 가격설정자의 입찰가격이 상승할 것으로 예상하는 가격수용자 A 는 다음과 같은 자신의 이익함수에 대해

$$\begin{aligned} \pi_A(\lambda_B, P_A) &= \lambda_B P_A - C_A(P_A) \\ &= \lambda_B P_A - (a_A + b_A P_A + c_A P_A^2) \end{aligned}$$

자신의 발전출력 P_A 의 증가와 이에 따른 가격설정자 B 의 입찰가격 λ_B 의 상승으로 인한 수입증가분($=\Delta \lambda_B \Delta P_A$)이 발전량 증가로 인한 발전비용 증가분($=a_A + b_A \Delta P_A + c_A \Delta P_A^2$)보다 크다면, 가격수용자 A 는 자신의 출력을 증가하여 현물가격의 상승을 유도하고자 하는 유인을 갖게 된다.

극단적으로 가격수용자 A 가 해당 입찰주기에서의 계통수요를 모두 공급할 수 있다면, 가격상한보다 약간 낮은 입찰가격을 가지고 입찰발전량을 계통수요까지 증가시킴으로써 전력공급을 독점하여 이익을 극대화하고자 할 것이다. 이는 위에서 설명한 바와 같이, 가격수용자 A 가 자신의 입찰발전량을 증가할수록 가격설정자 B 는 자신의 공급량 감소로 인해 입찰가격을 가격상한까지 높이려는 유인이 존재하기 때문이다. 따라서, 가격수용자의 공급능력이 높을수록 즉, 가격수용자의 시장지배력이 클수록 가격설정자는 자신이 현물가격을 설정함으로써 얻을 수 있는 이익이 감소하게 된다. 그러므로, 이를 예상하는 가격설정자 B 는 자신이 가격을 설정하기보다는 절대적으로 가격을 수용하고자 할 것이다.

결과적으로, 가격설정자의 입찰용량제약이 발생하는 경우에도 가격수용자의 입찰용량제약이 발생하는 경우와 동일한 결과를 발생하게 된다. 즉, 이와 같은 경우에는 가격설정자가 매우 낮은 입찰가격(극단적으로는 0의 입찰가격(zero-bidding))으로 자신의 최대발전용량을 입찰하여 가격수용을 통해 이익을 극대화하고, 또한 가격수용자는 상대가 이러한 전략으로 입찰에 참여할 것을 예상하여 자신의 입찰가격을 가격상한까지 상승시키는 유인을 갖게 된다.

4.3 용량제약 하에서의 전력가격 결정에 관한 분석

위에서 수행한 분석을 바탕으로, 발전사업자의 입찰용량이 자신의 최대발전용량에 의해 제약되는 경우 즉, 시장지배력이 특정 발전사업자에게 집중되는 경우의 전력가격 결정에 대해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

특정 발전사업자의 입찰발전량이 제약되는 경우에는 입찰가격 대신 입찰발전량을 자신의 전략으로 사용하게 된다. 전술한 바와 같이, 시장지배력이 어떤 게임참여자(즉, 가격수

용자 또는 가격설정자)에게 집중되는지 여부와는 상관없이 용량제약이 발생하는 발전사업자(즉, 시장지배력이 낮은 발전사업자)는 상대보다 낮은 가격으로 입찰하여 상대의 입찰가격으로 가격을 수용하고자 하며, 이를 통해 발전입찰시장에서 자신이 공급할 수 있는 최대한으로 전력을 공급하고자 한다. 또한, 이를 예상하는 용량제약이 발생하지 않는 발전사업자(즉, 시장지배력이 높은 발전사업자)는 자신이 행사할 수 있는 최소한의 시장지배력 하에서도 이익을 극대화하기 위해, 가격상한까지 입찰가격을 높임으로써 해당 입찰주기에서의 전력현물가격을 상승시키고자 한다.

즉, 시장지배력이 특정 발전사업자에게 편중되는 발전입찰 시장에서는 시장지배력이 낮은 참여자는 자신의 이익을 극대화하는 가격을 설정하는 것보다는 자신의 공급량(즉, 시장점유율)을 극대화하는 것 다시 말하면, 전력공급을 상대보다 우선하여 자신의 공급량을 증가시키는 것에 대해 관심을 갖게 되며, 그 결과 가격설정에 대한 결정을 시장지배력이 높은 참여자에게 전가한다. 이는 더 이상 입찰가격을 자신의 입찰전략으로 고려하지 않음을 의미한다. 또한, 시장지배력이 높은 발전사업자는 자신이 가격을 설정하게 되어 상대에 비해 전력공급에 대한 우선순위가 낮아지더라도 이미 자신이 공급할 수 있는 전력량을 확보하고 있기 때문에, 전력가격을 가능한 한 높게 유도하여 자신의 이익을 극대화하고자 하는 유인을 갖게 된다.

따라서, 경쟁적 전력시장이 합리적으로 운영되기 위해서는 각 발전사업자의 시장지배력을 동일하게 유지하는 것이 전력가격을 안정시킬 수 있는 방법임을 알 수 있다. 결과적으로, 각 발전사업자에 대한 시장지배력의 불균형은 곧 전력가격의 상승을 초래하며, 이는 경쟁을 통해 최종수용자의 합리적인 전기요금을 유도하고자 하는 경쟁적 전력시장의 목적과 상반되는 결과를 발생하게 된다.

5. 사례 연구

본 절에서는 전술한 발전입찰경쟁에서의 입찰전략 및 용량제약 하에서의 전력가격 결정에 대한 분석결과를 구체적인 사례를 통해 증명한다. 이를 위해, 우선 발전입찰경쟁 시 각 발전사업자의 최적입찰전략과 이에 따른 균형전략에 대한 분석을 수행하며, 이 결과를 바탕으로 특정 발전사업자의 입찰발전량이 자신의 최대발전용량에 의해 제약되는 경우에는 각 발전사업자의 입찰전략과 균형전략이 어떻게 변경되는가에 대해 분석하고자 한다.

5.1 발전입찰경쟁에서의 균형전략

임의의 입찰주기 t 에서의 계통수요를 $D_t = 350MW$, 두 발전사업자 A 와 B 의 비용함수를 각각 다음과 같이 가정한다.

$$C_A(P_A) = 12 + 7.3P_A + 0.32P_A^2$$

$$C_B(P_B) = 5 + 5.5P_B + 0.35P_B^2$$

식 (8)과 (9)를 이용하여, 이 발전입찰게임의 전략집합 즉, 각 발전사업자가 가격설정자가 될 경우의 최적입찰가격과 이 가격에서의 발전사업자의 이익을 계산하면 다음과 같다.

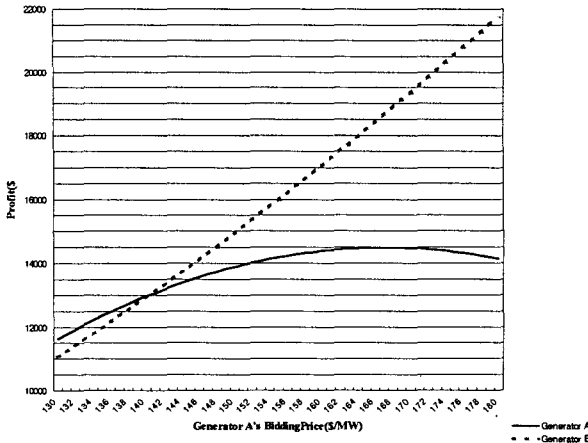


그림 1 발전사업자 A가 가격을 설정할 경우의 이익곡선
Fig. 1 Profit curve when player A is the price-setter

$$S = \{\lambda_A^* = 167.05\$/MW, \lambda_B^* = 158.31\$/MW\}$$

$$\pi_A(\lambda_A^*) = \$14,485, \quad \pi_B(\lambda_A^*) = \$18,636$$

$$\pi_A(\lambda_B^*) = \$17,804, \quad \pi_B(\lambda_B^*) = \$12,870$$

이 결과, 각 발전사업자는 자신이 가격을 수용하는 것을 선호하게 되므로, 두 발전사업자는 가격수용경쟁에 참여하게 된다.

발전사업자 A가 가격을 설정할 경우의 A의 최적입찰가격에 대한 발전사업자 B의 최적발전량, 총 발전비용 및 λ (W당 발전비용은 다음과 같다.

$$P_B(\lambda_A^*) = 230.78MW$$

$$C_B[P_B(\lambda_A^*)] = \$19,916$$

$$UC_B(\lambda_A^*) = \$86.30/MW$$

이와 같은 방법으로, 다음과 같이 발전사업자 B가 가격을 설정할 경우의 최적입찰가격에 대한 발전사업자 A의 최적발전량과 이 때의 총 발전비용 및 MW당 발전비용을 구할 수 있다.

$$P_A(\lambda_B^*) = 235.95MW$$

$$C_A[P_A(\lambda_B^*)] = \$19,550$$

$$UC_A(\lambda_B^*) = \$82.90/MW$$

따라서, 이와 같은 가격수용경쟁에서 자신이 예상하는 현물가격에서의 단위 발전비용이 보다 낮은 발전사업자 A는 자신의 단위 발전비용으로 가격을 입찰하여 가격수용경쟁에서 유리한 위치를 차지하고자 할 것이다. 또한, 이를 예상하는 발전사업자 B는 자신의 최적입찰가격으로 가격을 설정할 때의 이익과 발전사업자 A가 입찰할 것으로 예상하는 단위 발전비용을 현물가격으로 설정할 때의 이익을 비교하여 보다 많은 이익을 얻을 수 있는 대안을 선택한다. 이를 비교하면 다음과 같다.

$$\pi_B(\lambda_B^* = \$158.31/MW) = \$12,870$$

$$\pi_B(\lambda_A^* = \$82.90/MW) = \$4,274$$

$$P_B(\lambda_A^*) = 115.43MW$$

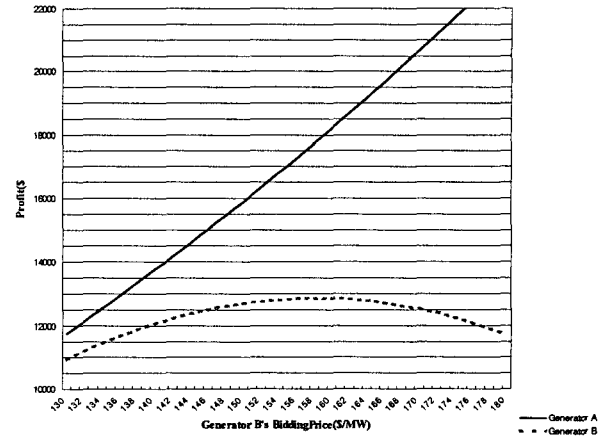


그림 2 발전사업자 B가 가격을 설정할 경우의 이익곡선
Fig. 2 Profit curve when player B is the price-setter

이 결과, 발전사업자 B는 자신이 가격을 설정할 경우 보다 많은 이익을 얻을 수 있으며, 가격설정 시 최대이익을 얻을 수 있는 가격은 $\lambda_B^* = \$158.31/MW$ 이므로, 이 가격을 자신의 전략으로 선택하게 된다.

또한, 자신이 가격수용자가 될 것을 예상하는 발전사업자 A는 상대가 자신의 전략을 고려하여 최대이익을 얻을 수 있는 가격 λ_B^* 로 입찰할 것을 알고 있으므로, 발전사업자 A는 식 (4)를 통해 자신의 최적입찰발전량을 계산할 수 있다. 위의 사례에서, 가격수용자 A의 최적입찰발전량은

$$P_A(\lambda_B^* = \$158.31) = 235.95MW,$$

가 된다. 따라서, 이 발전입찰게임의 현물가격은 $\lambda_i = \lambda_B^* = \$158.31/MW$ 으로 결정되며, 각 발전사업자의 계통공급량은 각각 $P_A = 235.95MW$, $P_B = 114.05MW$ 로 승인된다. 또한 이 발전입찰게임의 균형에서 각 발전사업자는 $\pi_A(\lambda_B^*) = \$17,804$ 와 $\pi_B(\lambda_B^*) = \$12,870$ 의 이익을 얻게 된다.

5.2 용량계약 하에서의 전력가격 결정

전술한 결과를 바탕으로 발전사업자의 입찰발전량이 자신의 최대발전용량에 의해 제약되는 경우, 전력의 현물가격 결정과정이 어떻게 변경되는가를 증명하고자 한다. 이를 위해, 앞 절의 가정에 가격설정자 B의 최대발전용량은 100MW이고 입찰주기 t에서의 가격상한은 \$200/MW라는 가정을 추가한다.

만약 발전사업자 B의 입찰용량에 대한 제약이 없다면, <그림 2>에서 보여주는 바와 같이 발전사업자 B는 \$158.31/MW의 가격으로 입찰할 경우 114.05MW의 공급량을 승인받게 되어 입찰을 통해 총 \$12,870의 최대이익을 얻을 수 있다. 그러나, 용량계약으로 인해 최대입찰량이 100MW로 제한되므로 발전사업자 B는 이와 같은 입찰전략을 제시할 수 없다. 따라서, 발전사업자 B는 자신의 이익을 극대화할 수 있는 공급량에 대한 결정을 입찰전략으로 선택해야 한다. 100MW로 입찰량 제약을 받는 발전사업자 B가

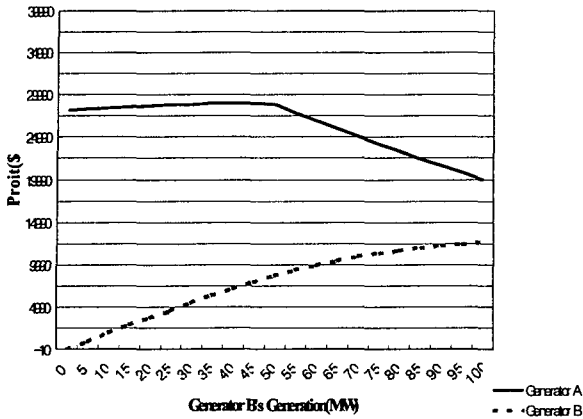


그림 3 발전사업자 B의 입찰발전량제한 시 발전사업자 B가 가격을 설정할 경우의 이익곡선
 Fig. 3 Profit curve when player B is the price-setter under constraining on his bidding generation

가격을 설정할 경우, 공급량에 따른 이익곡선은 <그림 3>과 같다. 그 결과, 발전사업자 B는 자신의 최대발전량 100MW를 공급하기 위해서 \$167.30/MW의 가격으로 입찰할 경우 \$12,675의 최대이익을 얻을 수 있다.

만약 발전사업자 B가 자신의 이익을 증가시키기 위해 입찰가격을 가격상한까지 높이고자 한다면, 이를 예상하는 발전사업자 A는 자신의 이익을 극대화하기 위해, 식 (3)에 따라 입찰발전량을 301.09MW로 변경할 것이다. 그러므로, 발전사업자 B가 가격상한으로 입찰할 경우의 이익은 \$8742로 감소한다.

그러므로, 발전사업자 B는 자신이 가격을 설정하는 경우에는 최대발전량 100MW를 계통에 공급하여 \$12,675 이상의 이익을 얻을 수 없음을 알 수 있다. 따라서, 발전사업자 B는 자신의 최대발전량을 공급하면서 이보다 많은 이익을 얻기 위해, 발전사업자 A가 가격상한으로 현물가격을 설정하도록 유도하고자 할 것이다. 이를 위해 발전사업자 B가 최대발전량과 함께 0의 가격으로 입찰한다면, 이를 예상하는 발전사업자 A는 자신이 가격이 가격을 설정하는 것이 상대와 가격수용경쟁을 수행하는 것보다 유리하게 된다(이는 가격수용경쟁 시에는 참여자 모두 입찰가격을 낮추고자 하는 유인이 존재하기 때문이다).

표 1 발전사업자 B가 가격을 설정할 경우의 최대이익
 Table 1 Maximum profit when player B is the price-setter

	발전사업자 A	발전사업자 B
현물가격 (\$/MW)	167.3	
발전량(MW)	250	100
총 이익(\$)	19,988	12,675

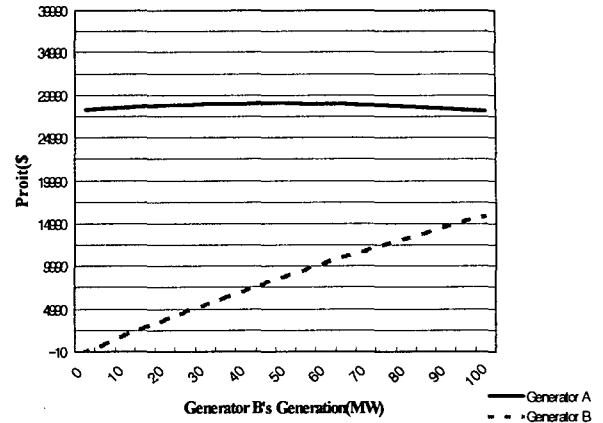


그림 4 발전사업자 B의 입찰발전량제한 시 발전사업자 A가 가격을 설정할 경우의 이익곡선
 Fig. 4 Profit curve when player A is the price-setter under constraining on B's bidding generation

발전사업자 A는 상대의 입찰발전량 제약으로 인해 최소한 250MW 이상을 계통에 공급할 수 있으므로, 식 (5)와 같은 이익함수에서 공급량이 고정되어 있다면 자신의 입찰가격 즉, 현물가격이 높을수록 이익이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 발전사업자 A는 가격상한까지 자신의 입찰가격을 높이게 되며, 이와 같이 입찰을 하게 되면 자신의 이익을 \$28,163으로 증가시킬 수 있다. 발전사업자 B도 또한 가격을 수용함으로써 \$19,410의 이익을 얻게 된다.

결과적으로, 발전사업자 B의 입찰발전량이 최대발전용량에 의해 제약받는 경우, 두 발전사업자 모두 발전사업자 A가 가격상한으로 현물가격을 설정하도록 하여 자신의 이익을 증가시키는 유인을 갖게 됨을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 임의의 입찰주기에 대한 각 발전사업자의 입찰전략에 대해 분석하였다. 본 논문에서는 발전입찰경쟁을 정적 완비정보게임으로 모델링하였으며, 이와 같은 발전입찰 게임에 참여하는 발전사업자는 입찰가격을 자신의 전략으로 사용할 수 있다.

표 2 발전사업자 A가 가격을 설정할 경우의 최대이익
 Table 2 Maximum profit when player A is the price-setter

	발전사업자 A	발전사업자 B
현물가격 (\$/MW)	200	
발전량(MW)	250	100
총 이익(\$)	28,163	15,945

각 발전사업자가 선호하는 가격에 대한 예상이 일치하는 경우 즉, 모든 발전사업자의 이익을 극대화시키는 현물가격 존재하는 경우에는 이 가격이 현물가격으로 결정되며, 발전사업자 간 가격경쟁은 존재하지 않게 된다. 한편, 각 발전사업자가 선호하는 가격에 대한 예상이 일치하지 않는 경우에는 발전사업자 간 가격경쟁이 발생하게 되며 이러한 가격경쟁은 상대의 가격을 현물가격으로 설정하고자 하는 가격수용경쟁과 자신의 가격으로 현물가격을 설정하고자 하는 가격설정경쟁으로 나타나게 된다. 그러나, 가격수용경쟁 또는 가격설정경쟁과는 무관하게 해당 입찰주기의 계통수요에 대한 한계발전비용이 낮은 참여자가 이와 같은 가격경쟁에서 보다 유리한 위치에서 게임에 참여할 수 있음을 증명하였다.

또한, 발전사업자의 입찰용량이 자신의 최대발전용량에 의해 제약되는 경우 즉, 시장지배력이 특정 발전사업자에게 집중되는 경우에는 입찰가격 대신 입찰발전량을 자신의 전략으로 사용하게 되며 그 결과, 시장지배력이 높은 발전사업자는 자신이 가격을 설정하게 되어 상대에 비해 전력공급에 대한 우선순위가 낮아지더라도 이미 자신이 공급할 수 있는 전력량을 확보하고 있기 때문에 전력가격을 가능한 한 높게 유도함으로써 자신의 이익을 극대화하고자 하는 유인을 갖게 됨을 증명하였다.

본 논문에서 도입한 가정이 다소 비현실적이라 하더라도, 이러한 발전입찰게임에 대한 분석을 통해, 결국 각 발전사업자의 비용감소가 자신의 이익을 극대화하기 위한 근본적인 유인이며 시장지배력은 시장의 가격신호를 왜곡할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 실제로 많은 제약과 파라미터를 고려하는 입찰전략을 개발하는 것은 매우 어려우며, 또한 상대의 비용정보 및 계통수요에 대한 불확실성을 고려해야 한다. 그리고, 실제 전략은 각 입찰주기에서의 발전입찰에 증발할 제약과 고려한 24시간 발전 스케줄링을 결합해야 한다. 그러나, 본 논문에서 기술한 발전입찰경쟁에 대한 분석은 전기에너지의 현물가격과 발전사업자의 전략적 행동에 대한 기본적인 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원(과제번호: EESRI-02-전-01)에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] Allen J. Wood and Bruce 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. Illic, 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] Prajit K. Dutta, "Strategies and Games", The MIT Press, 1999
 [6] M. G. Park, B. H. Kim, J. B. Park, and M. H. Jung, "Power Transaction Analysis Using Game Theory", Trans. KIEE, Vol. 49A, No. 6, pp.266-271, Jun. 2000
 [7] K. H. Lee, "Mixed Strategy of Nash Equilibrium in Power Transaction with Constraints", Trans. KIEE, Vol. 51A, No. 4, pp.196-201, APR. 2002
 [8] R. W. Ferrero, J. F. Rivera and S. M. Shahidehpour, "Application of Games with Incomplete Information for Pricing Electricity in Deregulated Power Pools", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 1, pp.184-189, Feb. 1998
 [9] Shangyou Hao, "A Study of Basic Bidding Strategy in Clearing Pricing Auctions", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp.975-980, Aug. 2000
 [10] Daoyuan Zhang, Yajun Wang, and Peter B. Luh, "Optimization Based Bidding Strategies in the Deregulated Market", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp.981-986, Aug. 2000
 [11] Fusahuan Wen, and A. Kumar David, "Optimal Bidding Strategy and Modeling of Imperfect Information Among Generators", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 1, pp.15-21, Feb. 2001
 [12] Xiaohong Guan, Yu-Chi (Larry) Ho, and Fei Lei, "An Ordinal Optimization Based Bidding Strategy for Electric Power Suppliers in the Daily energy Market", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 16, No. 4, pp.788-797, Nov. 2001
 [13] 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, Nov. 2001
 [14] Lance B. Cunningham, Ross Baldick, and Martin L. Baughman, "An Empirical Study of Applied Game Theory : Transmission Constrained Cournot Behavior", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No. 1, pp.166-172, Feb. 2002
 [15] W. Vickrey, "Counter Speculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders", Journal of Finance, Vol. 16, pp.8-37, Mar. 1961

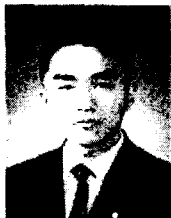
저 자 소 개



정 구 형 (鄭 求 亨)

1974년 9월 20일생. 2001년 홍익대학교
전기전자제어공학과 졸업. 2003년 동 대
학원 전기정보제어공학과 졸업(석사). 현
재 동 대학원 박사과정

Tel : 02-338-1621 Fax : 02-320-1110
E-mail : gal110412@wow1.hongik.ac.kr



강 동 주 (姜 東 周)

1975년 9월 9일생. 1999년 홍익대 공대
전자전기제어공학과 졸업. 2001년 동 대
학원 전기정보제어공학과 졸업(석사). 현
재 한국전기연구원 전력시장기술연구그
룹 연구원.

Tel : 055-280-1319 Fax : 055-280-1390
E-mail : djkang@keri.re.kr



김 발 호 (金 發 鎭)

1962년 7월 12일생. 1984년 서울대 전기
공학과 졸업. 1984~1990년 한국전력공사
기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992
년 Univ. of Texas at Austin 전기공학
과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업
(공학박). 1999년~현재 홍익대학교 전자전
기제어공학부 조교수

Tel : 02-320-1462 Fax : 02-320-1110
E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr



전 영 환 (全 瑩 煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 전기공
학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과
졸업(석사). 1997년 일본 동경대학교 전
기공학과 졸업(공학박). 2002년~현재 홍익
대학교 전자전기제어공학부 조교수

Tel : 02-320-1620 Fax : 02-320-1110
E-mail : yhchun@wow.hongik.ac.kr