게임이론을 이용한 전력시장 발전입찰에서의 거래가격 결정에 관한 연구

論 文
52A-6-6

A Study on Transaction Pricing of Generation Bidding in Electricity Market by Using Game Theory

李 光 浩*
(Kwang-Ho Lee)

Abstract-Competition among electric generation companies is a major goal of restructuring in the electricity industry. In electricity market, a huge volume of commodities will be traded through competitive bidding. The choice between uniform and pay-as-bid pricing for electricity auction has been one of most important issues in deregulated electricity market. This paper proposes a constrained Bertrand model for analyzing the electricity auction market of price competition model. The issue of the two pricing rules of uniform and pay-as-bid is studied from the viewpoint of consumer's benefit. This paper also shows that transmission congestion depends on the pricing mechanism. Pay-as-bid pricing gives less possibility of transmission congestion by price competition, and less burden to consumers in the simulation results.

Key Words : Electricity Auction, Pay-as-bid Pricing, Uniform Pricing, Bertrand Model, Transmission Congestion

1. 서 론

전력산업 분야가 수직통합형 구조에서 개방경쟁형 구조로 변화되는 흐름은 국제적인 추세이고 국내에서도 장기적인 계획 아래 추진 중에 있다[1]. 이러한 구조개편의 주목적은 경쟁을 통한 효율성의 증대와 비용의 감소이고 궁극적으로 전력요금의 인하를 기대하고 있다[2][3]. 전력산업이란 규모가 대형이고 전력이라는 특수한 물리현상을 대상으로 하기 때문에 일반 상품을 생산하는 산업에서와는 매우 다른 특성을 갖는다[4]. 더욱이 개방경쟁형 시장구조와 많은 전력거래 관련 규정까지도 새롭게 설계해야 하기 때문에 해외에서도 여러 시행착오를 겪는 등 학술적인 면과 실무적인 면에서 어려운 문제로 여겨지고 있다.

전력산업 구조개편의 성공 여부는 건전한 경쟁의 유도에 있으며 건전한 경쟁을 위해서는 시장의 구조와 거래 및 운용 규정이 올바르게 구축되어야 한다. 국내외에서도 아직까지 모범답안이라는 결론은 도출되어 있지 못하다. 따라서 전력시장이 운영되는 중에도 시장구조와 운용규정에 대한 감시와 검토 그리고 이론적인 분석이 지속되어야 한다[5].

전력시장을 분석하기 위해서는 전력거래 형태에 대한 경제학적 접근이 이뤄져야 하는데 현재 학술적으로 시도되고 있는 방법으로는 Cournot[6], Bertrand[1], 공급함수 기법[7] 등이 있다. 국내 전력시장에서 거래가 결정되는 방식은 수요와 공급의 양방향 입찰에 의한 것으로서 우선 입찰가격으로 경쟁을 하면서 거래량의 수급을 맞추는 방식이다. 이러한 시장형태의 모형화를 위해 경매(auction)이론의 적용이 시도되고 있으나 이론적으로 단일상품(single-unit)의 경매나 완전경쟁 및 독점형태의 경쟁을 가정하는[8] 한계가 있기 때문에 과점(oligopoly) 경쟁의 일반적 전력시장을 해석하기에는 부족한 면이 있다. 본 연구에서는 가격경쟁 모형인 Bertand 모형을 근간으로 여러 가지 제약조건이 포함된 제약(constrained) Bertrand 모형[9]으로써 전력 입찰시장에서의 거래가격 결정 방식을 분석한다.

향후 우리나라 발전입찰시장에서의 거래가격 결정은 단일가격(single-price) 방식을 따른다. 이는 낮은 입찰가 순서대로 거래를 성사시켜 수요를 만족시키는 최대의 입찰가격을 시장가격으로 정하여 기준 시점에서 거래되는 모든 전력에 대해 동일하게 지급하는 방식이다. 동일가격(uniform-price) 방식이라고도 하며 이와는 반대 개념으로 입찰가에 따라 가격이 결정되는 방식을 차등가격(discriminatory) 방식이라고 한다[5]. 우리의 전력시장에서는 이미 단일가격 방식으로 정해졌지만 선진 외국에서는 아직 많은 논의가 진행 중이 있으며 두 가지 방식에 대한 비교 연구가 발표되고 있다[8,10,11].

전력시장은 시장설계시에 예상한대로만 운영되지는 않는다. 예기치 못한 현상과 부작용이 나타날 가능성이 분명히 존재하며 이에 대비하기 위해서는 차등가격 방식과 같이 채택되지 못한 부분에 대해서도 지속적으로 연구가 진행되어야 한다. 본 논문은 향후 거래가격 결정 방식에 보완이 필요할 때를 대비하는 의미가 있다.

발전입찰시장에서 가격을 결정하는 방식의 가장 중요한 고려사항은 정직한 입찰가를 유도하는 것이다[5]. 즉 발전사업자가 한계비용을 입찰가로 제시하도록 하는 것이며 이를 경제학 용어로 유인일치(incentive compatible)라고 한다. 유인일치를 이루기 위해서는 단일가격 방식이 보다 유리한 것으로 알려져 있고 또한 고정비용의 회수, 시장운용에서의 용이성과 효율성 면에서도 효과적이라 할 수 있다. 하지만 가격경쟁의 원론적 측면과 가격의 인하라는 구조개편의 기본

* 正 會 員 : 檀國大 電氣電子컴퓨터工學部 副敎授·工博
接受日字 : 2002年 12月 31日
最終完了 : 2003年 4月 9日

취지 그리고 시장지배력(market power)의 방지 관점에서 보면 차등가격 방식이 우월한 것으로 알려져 있다[5].

이와 같이 두 가지 방식은 장단점이 있음에도 불구하고 충분한 분석과 검토가 이뤄지지 못한 것이 현실이다. 미국 캘리포니아 전력난의 문제점 분석에서도 지적되었듯이 연방에너지규제위원회(FERC)에서 차등가격 방식의 또 다른 표현인 입찰가방식(pay-as-bid)으로의 수정을 주장하고 있으며 비교 분석에 대한 심도 있는 연구가 진행되고 있다[8,10].

본 연구에서는 제약 Bertrand 모형으로 전력거래 해석기법과 발전입찰시장에서의 두 가지 가격결정방식의 비교분석 결과를 소개한다. 결과의 핵심은 단일가격 방식에서는 송전선 혼잡 현상이 높은 확률로 나타나는 반면에 입찰가방식에서는 송전선 혼잡이 가격경쟁에 의해 낮은 확률로 나타난다는 것이다. 이는 혼잡비용의 감소, 즉 시장지배력의 약화를 의미하며 거래가격의 인하에 차등가격 방식이 효과적이라는 일면을 나타내는 것이다.

2. 제약 가격경쟁 모형 해석

2.1 일반적 가격경쟁 모형

기업의 경쟁을 가격의 관점에서 해석한 모형이 Bertrand 가격경쟁 모형이다. 즉 기업은 가격을 낮춤으로서 경쟁기업보다 더 많은 판매를 통해 이득을 극대화하려는 전략을 사용한다는 해석이다. 여기에는 동일한 제품이라는 가정과 구매자는 낮은 가격의 제품을 구매한다는 가정이 사용된다. 따라서 기업은 생산량의 제한이 없고 생산비용이 일정하다면 상대방보다 조금 낮은 가격의 언더컷(under cut)을 통해 전체 수요를 공급하게 된다. 결국 언더컷 경쟁은 공급자의 이득이 영인 상태로 수렴하고 이는 사회적 이득을 최대로 하는 균형점이 된다[9].

전력산업의 경우에 사업자 단독으로 전체의 전력수요를 공급하는 상황은 일어나기 어렵다. 따라서 가격경쟁을 하더라도 발전용량 제약조건, 송전선 용량조건, 또는 변동 한계비용에 의해 발전력 배분이 발생한다. 이 경우에 기업의 가격전략은 무조건적 언더컷이 아닌 모든 참여자의 용량조건과 송전계통의 제약조건을 이용하는 방향으로 이루어질 것이다.

2.2 제약조건 반영 가격경쟁 모형

Bertrand 가격경쟁 모형에서 생산량 등에 제약이 있는 경우 균형점은 유일한 가격으로 존재하지 않음이 이미 오래 전에 소개된 바 있다(1897 Edgeworth)[9]. 본 연구에서는 게임이론에서의 복합전략(mixed strategy) 균형점 개념으로 이를 해석한다. 다음은 가격경쟁 모형에서 발전량 제약이 있는 경우의 균형점에 대한 고찰이다.

시장에는 두 개의 기업이 있으며 한계비용은 각각 28원/MW로 일정하고 수요함수는 $p=100-0.1*(q_1+q_2)$이다. 여기서 q_1, q_2는 각각 기업 1, 2의 발전량이고 p는 가격을 나타낸다. 만약 제약조건이 없으면 두 기업은 가격경쟁을 통해 $p_1=p_2=28$원의 입찰가로 수렴할 것이고 이때의 발전량은 각각 360MW이다.

하지만 두 기업의 최대발전량이 360MW이라면 기업2의 전략에 대해 기업1은 다음과 같이 전략 수정의 유인(incentive)을 갖게 된다. 기업1에 대한 잔여수요(residual demand)곡선과 한계비용곡선 그리고 잔여한계수입(residual marginal revenue)곡선을 나타내면 그림1과 같다. 미시경제학 이론에 의해 기업1의 최대이득은 한계수입곡선과 한계비용이 만나는 점에서의 발전량(180MW)과 그때의 가격 46원에서 나타난다. 즉 기업1은 28원이 아닌 p_1=46원의 입찰가 전략으로 수정할 것이다.

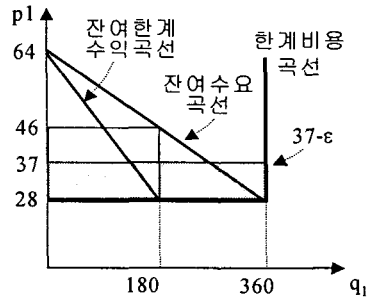

그림 1 제약조건 가격경쟁 모형 사례

Fig. 1 Example of constrained price competition model

이에 대해 기업2의 전략을 살펴보면, p_1보다 약간 낮은 가격($p_2=p_1-\varepsilon$)을 취함으로서 이득을 극대화할 수가 있다. 즉 기업2는 p_1에 대한 언더컷 경쟁을 선택할 것이다. 이에 대한 기업1의 전략도 역시 언더컷 경쟁이 된다. 이러한 가격 인하 경쟁은 37원 이하까지 내려가지는 않는다. 만약 기업2가 37원을 선택한 경우, 기업1이 언더컷을 할 경우에 얻는 이득은 $\pi_1=(37-\varepsilon-28)*360=3240-\varepsilon$' 인 반면 p_1=46원을 선택하는 경우에 얻는 이득이 $\pi_1=(46-28)*180=3240$원으로서 오히려 크기 때문이다. 따라서 기업1은 p_1=46원을 선택할 것이고 이에 대한 대응으로 기업2는 46원에 대한 언더컷을 선택함으로서 두 기업은 37원~46원 사이에서 언더컷 경쟁을 벌일 것이다.

이와 같이 제약조건이 포함된 가격경쟁 모형에서 유일한 균형가격이 존재하지 않음을 알 수 있으며 단순(pure) 균형전략이 나타나지 않는 문제에서의 균형점은 복합전략으로 해석된다[1][9][12].

2.3 균형점 계산

복합전략이란 참여자들이 하나의 전략을 선택하는 것이 아니고 다수의 전략에 대해 확률분포를 갖는 선택을 하는 것이다[9][12]. 복합전략이 나타나는 게임으로는 '가위-바위-보' 게임이 있다. 각 참여자가 3개의 전략변수를 각각 1/3의 확률로 선택한다는 것이 잘 알려져 있으며 이를 내쉬균형 개념으로 계산한 결과가 참고문헌[1]에 소개되어 있다.

게임의 균형점을 해석하기 위한 몇 가지 방식이 있지만 복합전략을 계산하는 데에는 보수(payoff)행렬기법이 사용된다[13]. 행렬로 표현되는 게임은 2인 행렬과 3인 이상의 다수행렬게임으로 구분된다. 2인 행렬게임에서의 균형점 조건은 선형 상보(complementarity) 형태로 나타나며 *Lemke*[14] 알고리즘에 의해 해가 구해진다. 반면에 다수행렬게임에서는 비선형 형태가 되어 일반적인 해법은 아직까지 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 2인 행렬게임의 문제를 대상으로 한다.

앞 절에서 소개된 발전력 제약이 있는 가격경쟁 모형 사례에 대해 보수행렬 기법을 적용하여 복합전략 균형점을 계

산하는 과정은 다음과 같다. 두 참여자는 기업1과 기업2이고 전략변수는 입찰가격으로서 각각 31원~50원 사이를 1원 간격으로 이산화(discretize)하여 각각 20개의 선택변수를 갖는다. 따라서 게임에서 나타나는 모든 경우의 수는 20×20=400개이며 각각의 경우에 대해 두 참여자의 이득을 계산한 보수행렬은 각각 20×20 크기가 된다. 보수행렬의 계산은 가격경쟁에서 이긴 기업은 360MW를 생산하고 패한 기업은 수요의 잔여량을 생산하는 방식으로 이루어진다.

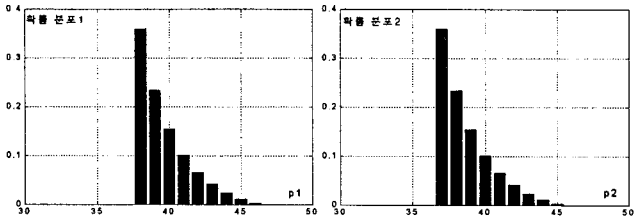

그림 2 가격경쟁 모형의 복합전략
Fig. 2 Mixed strategy of price competition model

두 보수행렬에 대해 Lemke 알고리즘으로 복합전략을 계산한 결과 그림2와 같은 확률분포 형태의 가격 전략이 구해진다. 전략1을 보면 38원~46원 사이에서 확률적으로 입찰을 하고 전략2는 37원~45원 사이에서 입찰을 하게 된다. 양쪽 분포의 범위가 약간 차이가 나는 것은 입찰가가 동일한 경우에 문제의 단순성을 위해 기업1이 이기는 것으로 간주하였기 때문이다. 만약 동일 입찰가의 경우 기업2가 이긴다고 가정하면 두 분포는 반대로 나타난다.

2.4 거래가격 분석

그림2의 결과는 전력거래의 지불가격을 입찰가로 정하는 경우, 즉 입찰가 방식을 택하는 경우로서 평균기대가격은 39원이고 양쪽 기대이득은 3240원으로 동일하다. 만약 시장가격으로 동일하게 지불하는 동일가격 방식으로 계산하면 두 기업의 입찰 전략은 두 종류의 단순 내쉬균형, (46원, 28~45원) 혹은 (28~45원, 46원)으로 계산된다. 28~45원을 선택한 쪽은 360의 전력을 46원에 판매하여 6480원의 이득을 얻는 반면 46원을 선택한 쪽은 180을 판매하여 3240원의 이득을 얻게 된다. 따라서 평균가격은 46원이다. 만약 둘 다 발전단가인 28원을 선택하면 이득은 영이 되기 때문에 어느 한쪽은 46원을 선택하게 되어 균형점에 이르는 것이다. 이는 게임이론에서의 '겁쟁이 게임(game of chicken)'에 해당된다[15].

이상의 비교와 같이 입찰가 방식에서는 기업의 기대이득이 모두 3240원이고 평균가격이 39원인데 비하여 동일가 방식에서는 3240원과 6480원의 기대이득이 나타나고 평균가격은 46원으로 높게 나타난다. 이러한 예는 입찰가 방식에서 기대수입이 낮게 나타남을 보이는 것이며 기대수입이 낮다는 것은 소비자의 지출이 감소한다는 의미이다. 한편 전력의 공급량을 비교하면 입찰가 방식에서는 기대값으로 598.9MW, 동일가 방식에서는 540MW이다.

기대수입의 감소와 공급량의 증가란 측면에서는 입찰가 방식이 유리하지만 동일가격 방식은 유인일치를 이루어 실질적인 한계비용으로의 입찰을 유도하고 시장설계 및 운용의 효율성과 용이성, 그리고 고정비용의 회수라는 장점을 갖는 것으로 알려져 있다[5]. 그러나 위의 사례를 보면 동일가격 방식에서 일부는 한계비용(28원)으로 입찰을 하지만 일부는 그보다 높은 가격(46원)을 사용하여 결과적으로는 높은 시장가격이 형성될 수도 있다.

3. 동일가격방식과 입찰가방식

본 연구에서는 동일가격 방식과 입찰가격 방식에 따라 선로에서의 혼잡현상이 다르게 나타남을 분석한다. 즉 입찰가격 방식에 의해 혼잡현상이 크게 감소할 수 있다는 가능성을 내쉬균형 복합전략 계산으로 보인다. 이를 위해 혼잡현상의 발생 조건을 포함하는 다음의 계통에 대해 자세히 살펴본다.

3.1 분석대상 모형

대상 계통은 그림3과 같이 3모선에 4개의 발전기와 3개의 선로를 포함한다. 모선1과 2에는 한계비용 함수가 각각 $f_1(q_1)=15+1/4*q_1$, $f_2(q_2)=10+1/5*q_2$ 이고 발전 최대용량이 각각 60MW, 20MW인 발전기가 있고 모선3에는 발전 입찰시장에서 전략적으로 가격경쟁을 하는 2개의 발전기 Ga, Gb가 있다. 부하 D는 모선3에 집중된 140MW의 고정(fixed) 수요로 가정한다. 해석의 단순성을 위해 고정값을 가정한 것이고 탄력성을 갖는 부하로 가정해도 결과는 크게 달라지지 않는다. 송전선의 리액턴스는 모두 0.1 pu이고 모선1과 모선3 사이의 선로 T에서의 한계용량은 40MW이다.

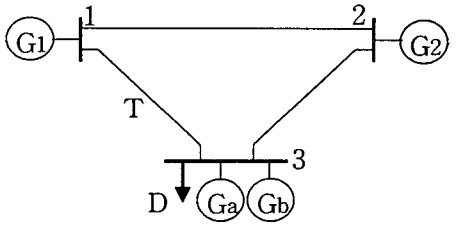

그림 3 분석 대상 3모선 계통도
Fig. 3 Diagram of 3 bus sample system

발전기 G1과 G2는 한계비용에 의해 가격과 발전량이 정해지고 발전기 Ga와 Gb는 일정 발전단가 각각 MCa=10원/MW, MCb=15원/MW과 동일한 최대용량 50MW의 조건으로 전력입찰시장에서 가격경쟁을 통해 이득을 극대화하려고 한다. 입찰시장에서의 제한가격(price cap)은 32원/MW이다.

3.2 전력거래의 결정

전력거래량과 가격의 결정은 시장운영자가 담당하는데 이때 비용 최소화 개념이 사용된다. 발전기 G1과 G2의 한계비용함수와 최대발전력, 그리고 입찰시장에서 제출된 Ga와 Gb의 입찰가와 최대발전력의 정보를 이용하여 다음 식(1)과 같이 최소비용의 발전력 q_1^*, q_2^*, q_a^*, q_b^*를 결정한다.

$$\min\{C_1(q_1)+C_2(q_2)+p_a\cdot q_a+p_b\cdot q_b\} \quad (1)$$
$$s.t. \quad q_1+q_2+q_a+q_b=140$$
$$2/3\cdot q_1+1/3\cdot q_2 \le 40$$
$$q_1\le 60,\ q_2\le 20,\ q_a\le 50,\ q_b\le 50$$

여기서 $C_i(q_i)$는 $dC_i/dq_i = f_i(q_i)$를 만족하는 발전비용함수이고 p_a와 p_b는 각각 Ga와 Gb의 입찰가격이다. 제약조건 중 첫 번째는 수급조건, 두 번째는 선로제약조건, 나머지는 최대발전력 조건이다.

최적화를 계산하여 각 발전기에서의 발전력이 구해지면 그에 따른 각 모선에서의 전력가격이 결정된다. 모선1과 2에서의 가격은 한계비용인 $f_1(q_1^*)$과 $f_2(q_2^*)$이 되고 모선3에서는 입찰시장의 가격결정 방식에 따라 다르다. 동일가격 방식에서는 영이 아닌 q_a와 q_b 중에서 높은 가격으로 정해진다. 따라서 부하에서의 전력구매가격과 발전기 Ga, Gb에 지불되는 판매가격이 같다. 하지만 입찰가격 방식에서는 발전기 Ga와 Gb의 판매가격은 각각 입찰가격으로 정해지며 구매가격은 영이 아닌 q_a와 q_b 중에서 높은 가격으로 정해진다.

각 발전기에서의 한계비용과 최대발전력, 그리고 제한가격을 반영하면 모선가격(nodal price)의 범위는 모선1에서 15~30, 모선2에서 10~14, 모선3에서 15~32이다. 따라서 가격이 가장 낮은 G2의 q_2는 20MW로 정해지고 q_a와 q_b는 G1의 한계비용특성과 입찰가격 p_a, p_b의 경쟁에 의해 결정된다.

송전선 제약조건을 만족하기 위해서는 q_1은 50MW를 초과할 수 없으므로 모선1에서의 실질적인 모선가격 범위는 15~27.5이다. 시뮬레이션에서는 입찰가격이 동일한 경우에 계산의 편의상 발전단가가 낮은 Ga가 우선 선택되도록 하였다.

3.3 이득분포의 분석

입찰가격에 따른 발전기 Ga와 Gb의 이득분포는 불연속으로 나타난다. 이는 입찰가격의 상대적 크기와 발전기 G1의 한계비용특성에 따라 최적화 문제에서 발전량이 불연속적으로 계산되기 때문이다. 또한 이러한 분포는 가격결정 방식에 따라서도 크게 달라진다. 입찰가격방식을 사용할 경우의 Ga의 이득분포에서 불연속이 나타나는 구간은 그림4와 같이 4개의 영역으로 구분된다.

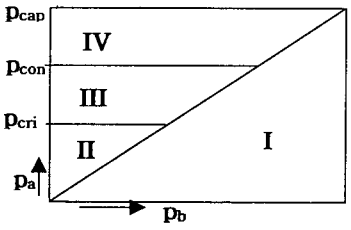

그림 4 이득의 불연속 구간(발전기 Ga)
Fig. 4 Sections of bid price domain for Ga

▷ 영역 I ($p_a \le p_b$): 입찰가 p_a가 우선가격(first price), 즉 p_b보다 같거나 낮은 경우로서 항상 최대값 50MW를 공급한다. p_a가 모선1의 모선가격보다 높더라도 q_1+q_2=70MW가 되어 잔여량이 70MW이기 때문이다. 따라서 영역I에서 Ga의 이득은 π_a=50*(p_a-10)으로 계산된다.

입찰가 p_a가 차점가격(second price)인 경우에는 반대로 q_b가 최대값 50MW로 정해지고 q_a는 20~50MW 사이의 값을 가지며 영역 II, III, IV로 세분된다.

▷ 영역 II ($MCa < p_a \le p_{cri}$): p_a가 G1에서의 한계비용 $f_1(q_1)$과 같거나 낮은 경우이다. 따라서 잔여량 70MW 중에서 q_a=50MW, q_1=20MW로 배분된다. 여기서 p_{cri}은 $f_1(q_1)$과 p_a가 같을 때의 가격으로서 $f_1(20)$=20원/MW이므로 p_{cri}=20이 된다. 이때의 이득은 π_a=50*(p_a-10)으로 계산된다.

▷ 영역 III ($p_{cri} < p_a \le p_{con}$): p_a가 p_{cri} 보다 높아지면 G1과 Ga 사이에 잔여량 70MW에 대한 최적배분으로 발전력이 결정된다. 최적배분의 조건은 $p_a = f_1(q_1^*)$이며 최적의 q_a^*는 20~50MW 범위에서 나타난다. 이때의 이득은 π_a= q_a*(p_a-10)으로서 p_a에 대한 2차함수 형태가 된다. q_1이 송전제약 때문에 50MW까지만 공급가능하므로 p_1의 최대값은 27.5원/MW이고 이 값을 p_{con}으로 표시하였다.

▷ 영역 IV ($p_{con} < p_a \le p_{cap}$): p_a가 p_{con} 보다 높아지면 q_1은 50MW이 되어 계통에는 혼잡현상이 나타나고 q_a=20MW로 일정하게 유지된다. 따라서 이때의 이득은 π_a =20*(p_a-10)으로 계산된다.

이상은 발전기 Ga의 이득분포에 대한 분석이지만 Gb에 대한 이득분포도 대칭성을 고려하면 비슷하게 구해진다. 또한 이는 입찰가격방식에 따른 이득분포이고 동일가격방식에 의한 이득을 살펴보면 이득값의 분포는 입찰가 방식과 다르지만 불연속이 나타나는 영역은 그림4에서 4개의 구간과 일치한다.

두 방식에서의 차이점은 우선가격으로 입찰한 전력에 어떠한 판매가격을 부과하는가에 있다. 따라서 그림4에서 우선가격에 해당되는 영역I에서만 이득의 값이 달라진다. 즉 영역I에서의 이득은 π_a=50*(p_b-10)로 계산되고 나머지 영역에서의 이득계산식은 동일하다.

3.4 발전입찰시장에서의 입찰전략

사례와 같은 입찰시장에서 입찰참여자의 가격경쟁 전략은 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 언더컷(undercut) 경쟁이고 다른 하나는 원천징수(withholding) 전략이다. 언더컷 경쟁은 낮은 가격으로 많은 양을 판매하려는 전략이고 원천징수 전략은 적은 양이지만 높은 가격으로 이득을 극대화하려는 것이다. 여기서 높은 가격이란 제한가격(price cap)을 의미한다.

입찰 참여자는 두 가지의 기본 전략을 비교하여 이득이 높은 쪽을 선택할 것이다. 따라서 참여자가 언더컷 경쟁을 하려면 적어도 제한가격으로 입찰할 때보다는 높은 이득이 기대되어야 한다. 언더컷에서의 이득은 가격결정방식에 따라 크게 달라지므로 전략의 선택도 가격방식에 크게 의존한다.

사례에서 Ga가 원천징수 전략을 선택하면 이득은 구간VI에서 π_w=20*(32-10)=440이고 입찰가격방식에서의 언더컷 경쟁을 하는 경우의 이득은 구간I에서의 이득 π_u=50*(p_a-10)로 계산된다. 따라서 $\pi_u > \pi_w$ 를 만족하는 p_a의 구간을 계산하면 p_a>18.8이다. 즉 Ga는 언더컷 경쟁을 하더라도 18원/MW 이하로는 하지 않을 것이다. 같은 방식으로 Gb가 언더컷 경쟁할 때 p_b의 범위를 계산하면 p_b>21.8이 된다. 따라서 Gb는 22원/MW 이상에서만 언더컷 경쟁을 할 것이고 Ga도 22원/MW 이하로 경쟁하는 것은 무의미하므로 22원/MW 이상에서만 언더컷 경쟁을 할 것이다. 두 참여자가 입찰가격방식으로 경쟁하는 경우의 균형전략이 실제로 22~32원/MW 사이에 형성되는지는 4절에서의 계산결과 분석에서 보인다.

만약 사례계통에 동일가격방식을 적용하면 Ga의 언더컷 경쟁의 기준은 p_a가 아닌 p_b>18.8, Gb의 기준은 p_a>21.8로 계산된다. 즉 상대방의 가격에만 영향을 받고 자신의 입찰가격에는 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

4. 균형점 전략의 비교해석

4.1 동일가격 방식의 결과

동일가격방식으로 판매가격을 결정하는 경우 발전기업 Ga와 Gb의 이득을 계산하면 그림5와 같은 분포가 나타난다. 3.3절에서의 분석과 같이 분포는 4개 영역으로 구분이 되고 특히 우선가격 영역에서는 자신의 가격이 아닌 상대방의 가격에 비례해서 이득이 증가함을 알 수 있다.

그림5와 같은 2개의 보수행렬에 대해 내쉬균형을 계산하면 '18≤p_a≤21, p_b=32' 의 단순전략이 구해진다. 발전기 Gb가 원천징수 전략으로 (32-15)*20=340원의 이득을, Ga가 언더컷 전략으로 (32-10)*50=1100원의 이득을 얻게된다. 만약 Gb가 언더컷 전략을 사용하면 그림5에서 알 수 있듯이 Ga는 p_a=21을 선택할 것이고 Gb는 p_b=32일 때 더 큰 이득을 얻게 되므로 'p_a=32, p_b=18' 의 전략은 균형점이 되지 못한다.

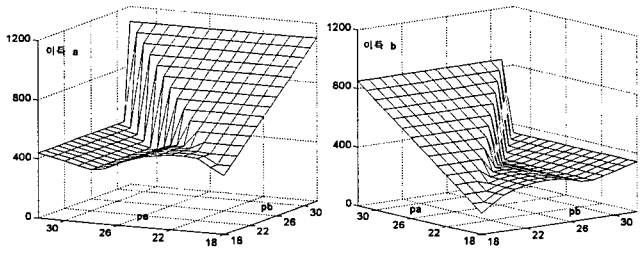

그림 5 동일가격방식에서의 이득분포
Fig. 5 Profit distribution by uniform pricing

내쉬균형에서 q_a=50MW, q_b=20MW이므로 송전선 T에는 혼잡현상이 나타난다. 하지만 입찰가격 방식을 사용하면 T에서의 혼잡현상이 감소되는 결과가 나타난다.

4.2 입찰가격 방식의 결과

입찰가격방식으로 판매가격을 결정하는 경우 이득을 계산하면 그림6과 같은 분포가 나타난다. 여기서도 분포는 4개 영역으로 구분이 되고 특히 우선가격 영역에서는 자신의 가격에 비례해서 이득이 증가함을 알 수 있다.

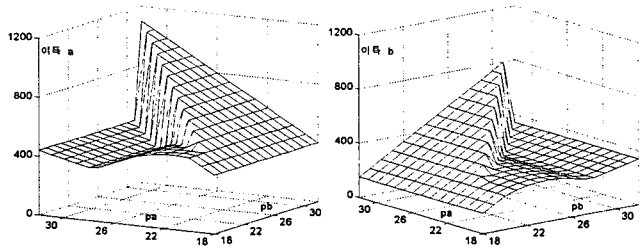

그림 6 입찰가격방식에서의 이득분포
Fig. 6 Profit distribution by pay-as-bid pricing

앞의 3.4절에서 살펴본 바와 같이 두 참여자는 22~32사이의 범위에서 입찰가격을 정할 것이다. 정확한 내쉬균형점의 계산에 앞서 동일가격방식에서의 균형점을 그림6의 이득분포에 적용해 보면 더 이상 균형점이 아님을 알 수 있다. 만약 p_b=32이면 Ga는 p_a=32를 선택할 것이고 이의 대응전략으로 p_b는 31을, 다시 p_a는 31을, 이의 대응전략으로 p_b=30을, p_a는 30을 선택할 것이다. 이와 같이 두 참여자는 일정한 균형점으로 수렴하지 않고 반복순환하는 전략이 나타나며 복합전략 형태로 균형점이 존재한다.

선형상보문제의 해법을 통해 각 참여자의 확률적 전략분포를 계산하면 그림7과 같다. 두 참여자는 각각 8개의 가격전략을 확률적으로 선택하며 각 전략에서도 두 부분으로 분리되어 나타난다. 분리된 영역과 그림4에서의 분리구간을 비교하면 각 참여자의 전략은 영역III과 영역IV에서 선택됨을 알 수 있다. 발전기 Ga는 0.8의 확률로 p_a={22, 23, 24, 25}를 선택하고 0.2의 확률로 p_a={29, 30, 31, 32}를 선택한다. 반면 Gb는 0.614의 확률로 p_b={22, 23, 24, 25}를 선택하고 0.386의 확률로 p_b={29, 30, 31, 32}를 선택한다. 이러한 전략이 선택될 때의 소비자 지출과 공급량, 그리고 혼잡현상을 각각 4.3과 4.4절에서 분석한다.

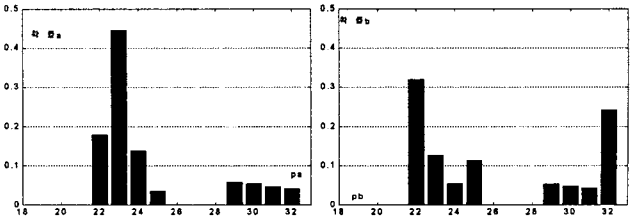

그림 7 입찰가격방식에서의 복합전략
Fig. 7 Mixed strategies by pay-as-bid pricing

4.3 기대수입 비교

내쉬균형이 동일가격방식에서는 단순전략으로, 입찰가격전략에서는 복합전략으로 나타남을 살펴보았다. 이에 따라 실제 거래되는 발전력과 그에 따른 수입(revenue)을 계산하면 표1과 같다.

표 1 발전량과 수입의 비교
Table 1 Comparisons of quantity and revenue

		Ga	Gb	Ga+Gb	G_1	G_2	G_1+G_2	전체G
수입 [원]	동일가	1600	640	2240	1375	280	1655	3895
	입찰가	1028.4	864.2	1892.6	1096.3	280	1376.3	3268.9
거래량 [MW]	동일가	50	20	70	50	20	70	140
	입찰가	42.84	34.95	77.79	42.21	20	62.21	140

입찰가격방식에서의 균형전략은 확률분포로 나타나기 때문에 이때의 수입과 거래량은 기대값으로 계산된다. 기업에서의 수입이란 전력시장에서 기업에게 지불되는 금액이므로 소비자의 지출과 직결된다. 표에서 알 수 있듯이 입찰가격방식에서 Ga의 수입은 동일가격방식에 비해 감소하고 Gb의 수

입은 증가한다. 한편 G1에서는 감소하고 G2에서는 일정하다. 전체적인 수입은 3895에서 3268.9로 약 16%가 감소한다.

거래량 또한 기대값으로 계산되며 수입의 비교에서와 같이 Ga에서는 감소, Gb에서는 증가, G1에서는 감소, G2에서는 일정하다. 하지만 전체 거래량은 일정 부하량인 140MW로 일정하다. 따라서 입찰가격방식에서는 동일한 부하를 공급하면서도 발전기업에 지불되는 비용이 감소하게 되므로 궁극적으로 전력요금의 인하를 기대할 수가 있는 것이다.

모선3의 Ga와 Gb의 거래량, 즉 모선3에서의 공급량이 증가하고 모선1에서 공급량이 감소하므로 송전선 T에서의 선로조류가 감소하여 혼잡현상이 완화됨을 예측할 수 있다.

4.4 혼잡현상 분석

동일가격방식에서 Ga는 p_a=18원/MW의 입찰가격으로 q_a=50MW의 전력을 32원/MW의 가격에 판매하고 Gb는 p_b=32원/MW의 입찰가격으로 q_b=20MW의 전력을 32원/MW의 가격에 판매하게 된다. 따라서 송전선 T에는 항상 40MW 조류의 혼잡현상이 나타난다. 하지만 입찰가격방식에서는 두 기업 모두 8개({22, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 32})의 전략을 확률적으로 선택하기 때문에 혼잡현상 또한 각 전략의 확률값에 따라 다르게 나타난다.

전체적으로는 내쉬균형에서 64(=8*8)개의 경우의 수가 나타나며 각각에서 송전선 T의 선로조류 기대값을 계산하면 다음 그림8과 같이 나타난다. 그림에서 p_a와 p_b축에서의 일련번호는 각각 {22~25, 29~32}에서 순서를 의미한다. 따라서 p_a={22~25}, p_b={22~25}일 때의 16개 경우에서 송전선 T에서의 선로조류는 40MW이하가 되어 혼잡현상이 나타나지 않음을 알 수 있다. 반면에 나머지 48개의 경우에서는 혼잡현상이 나타난다. 혼잡이 나타나는 경우와 그렇지 않은 경우의 확률은 결합확률(joint probability)로 계산할 수 있다. 동일가격방식의 균형점에서는 100% 확률로 혼잡현상이 발생한 반면 입찰가격방식에서는 49.12% 확률로 혼잡이 나타나지 않고 50.88% 확률로 혼잡이 나타나게 된다.

이러한 현상은 두 기업이 언더컷 경쟁, 즉 입찰가격인하 경쟁의 결과로 송전선 T의 공급측인 모선1에서의 모선가격과 공급량이 감소하고 부하측인 모선3에서의 공급량이 증가한 결과로 볼 수 있다. 또한 표1에서와 같이 입찰가격방식에서 기대수입이 낮게 나타난 것은 가격경쟁의 특성에 의한 면도 있지만 송전선에서의 혼잡현상 발생 확률이 낮아진 것도 주요 원인이라고 분석된다.

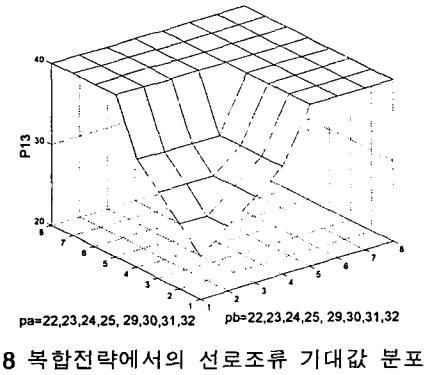

그림 8 복합전략에서의 선로조류 기대값 분포

Fig. 8 Expected power flows at mixed strategies

5. 결 론

우리나라 발전입찰시장에서의 가격결정방식은 이미 동일가격방식으로 결정되었다. 하지만 외국의 사례를 볼 때 이러한 방식이 입찰가격방식에 비해 절대적으로 우위에 있다고는 할 수 없다. 본 연구는 이러한 두 가지 방식을 이론적으로 비교한 것이다.

입찰시장에서 발전기업의 입찰가격 결정전략을 이론적으로 해석하기 위해서 가격결정 모형인 Bertrand 모형에 제약조건을 포함하는 정식화와 내쉬균형점 해석기법을 적용하였다. 입찰가격방식이 적용될 때의 내쉬균형은 확률분포를 갖는 복합전략으로 나타나기 때문에 선형상보문제의 해법인 Lemke 알고리즘을 사용하여 균형점 전략을 계산하였다.

가격경쟁모형에서 입찰자의 전략이 언더컷 경쟁과 원천징수 전략으로 대별되며 언더컷 경쟁을 할 때의 입찰가격 범위를 분석하였다. 이러한 범위에서 균형점이 복합전략으로 계산됨과 균형점에서의 기대수입이 동일가격방식보다는 입찰가격방식에서 낮게 나타남을 확인하였다.

주목할 사항은 가격결정방식에 따라 균형점에서 혼잡현상이 다르게 나타난다는 것이다. 복합전략 중에서 일부는 가격인하 경쟁을 통해 선로조류를 감소시키는 효과로 이어져 사례계통에서 내쉬균형의 50% 정도는 혼잡현상이 나타나지 않았다.

발전입찰시장에서의 가격결정방식은 전력시장의 효율성에 직결되는 매우 중요한 사항으로서 기대수입의 감소와 혼잡현상의 감소만으로는 두 방식의 우열을 판단할 수 없고 고정비용의 회수와 유인의 일치 특성, 시장운영의 단순성 등 종합적으로 검토해야 한다. 또한 전력시장은 예상한대로만 운영되지는 않고 예기치 못한 현상과 부작용이 나타날 수 있기 때문에 이미 결정되어진 방식이라 할지라도 이론적인 연구는 지속되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 2003학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] 이광호, "전력거래에서 제약조건이 고려된 내쉬균형점의 복합전략 연구," 전기학회논문지 51A권 4호 pp. 196-201, April 2002.

[2] 이광호, "송전선 제약조건에 따른 전력거래에서의 시장지배력 연구," 전기학회논문지, 51A권, 8호, pp.403-408, 2002. 8.

[3] X. Guan, Y.C. Ho, and D.L. Pepyne, "Gaming and Price Spikes in Electric Power Markets," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.16, No.3, pp.402-408, August 2001.

[4] 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.

[5] Steven Stoft, *Power System Economics: Design Markets for Electricity*, IEEE/Wiley, February 2002.

[6] B.F. Hobbs, "Linear Complementarity Models of Nash-Cournot Competition in Bilateral and POOLCO Power Market," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.16, No.2, pp.194-202, May 2001.

[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] G. Federico and D. Rahman, "Bidding in an Electricity Pay-as-Bid Auction," *Blue Ribbon Report*, Available at: http://www.nuff.ox.ac.uk/Economics/papers/2001/w5/federico-rahmansept2001.pdf, 2001.

[9] D.W. Carlton, J.M. Perloff, *Modern Industrial Organization* , Addison-Wesley, 2000.

[10] A.E. Kahn, P.C. Cramton, R.H. Porter and R.D. Tabor, "Pricing in the California Power Exchange Electricity Market: Should California Switch from Uniform Pricing to Pay-as-Bid Pricing," *Blue Ribbon Report*, Januarary, 2001.

[11] Y.S. Son, K.H. Lee, S. Siddiqi and R. Baldick, "Multi-Unit Auctions with Market Power:Uniform and Pay-as-Bid Pricing in Electricity Market," *The 22nd USAEE/IAEE North American Conference*, Vancouver, BC, Canada, October, 2002.

[12] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*, The MIT Press, 1991.

[13] K.H. Lee and R. Baldick, "Tuning of Discretization in Bimatrix Game Approach to Power System Market Analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.18, No.2, pp.830-836, May 2003.

[14] C.E. Lemke and J.T. Howson, "Equilibrium Points of Bimatrix Games," *SIAM Journal of Applied Mathematics* 12, pp.413-423, 1964.

[15] 김영세, *게임이론*, 박영사, 2000. 8.

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(공박). 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