論 文
53A-8-10

연료제약 발전기를 고려한 전력거래 해석기법 연구

Analysis on a Power Transaction with Fuel-Constrained Generations in an Electricity Market

李 光 浩*
(Kwang-Ho Lee)

Abstract - When the energy resource available to a particular plant (be it coal, oil, gas, water, or nuclear fuel) is a limiting factor in the operation of the plant, the entire economic dispatch calculation must be done differently. Each economic dispatch calculation must account for what happened before and what will happen in the future. This paper presents a formulation and a solution method for the optimization problem with a fuel constraint in a competitive electricity market. Take-or-Pay (TOP) contract for an energy resource is the typical constraint as a limiting factor. Two approaches are proposed in this paper for modeling the dispatch calculation in a market mechanism. The approaches differ in the subject who considers and inserts the fuel-constraint into its optimization problem. Market operator and each power producer having a TOP contract are assumed as such subjects. The two approaches are compared from the viewpoint of profits, surplus, and social welfare on the basis of Nash Equilibrium.

Key Words : Electricity Market, Fuel-Constraint, Take-or-Pay Contract, Market Operator, Bilevel Optimization

1. 서 론

전력산업에서 규모의 경제를 근거로 하는 독점/통합체제가 송전망 개방과 경쟁을 통한 효율성 제고라는 명분 하에 크게 변화되고 있다. 이러한 시도는 90년대 초반 영국에서 시작되어 현재 유럽국가 60% 이상이 전력시장 도입을 추진하고 있다. 세계 최대전력시장인 미국도 90년대 중반 이후 시작되어 현재 21개 주에서 경쟁적 전력시장이 운영되고 있으며 세계적으로 총 40여개 국가에서 구조개편이 추진되고 있다[1].

국내에서도 2000년에 전력산업구조개편 촉진에 관한 법률이 국회를 통과하여 2001년에는 전기위원회 출범, 전력거래소 설립, 발전부문의 6개로 분할 등 발전경쟁체제의 틀을 마련한 바 있다. 또한 전력시장 운영규칙[2]이 한국전력거래소에 의해 제정되고 도매전력시장 설계와 운영시스템 구축이 완성됨으로서 전력시장운영의 기본 골격이 갖추어지게 되었다.

이러한 흐름과 국제적인 연구 동향에 따라 전력계통과 경제학, 산업조직론, 게임이론 등이 결합된 전력시장 해석에 관한 연구가 이루어져 왔다[3,4,5,6]. 지금까지의 연구에서는 전력공급자의 입찰전략을 다루는데 있어 최대발전력 조건 정도를 고려하였다. 하지만 액화천연가스(LNG) 연료를 사용하는 경우, 강제인수(take-or-pay, TOP) 조건의 계약이 존재하기 때문에 연료량에 대한 제약을 고려할 필요가 있다[7,8].

강제인수조건이란 상품구매자가 일정기간 동안에 정해진 가격으로 계약된 일정량의 상품에 대해 인수 여부에 관계없이 반드시 상품대금을 지불해야 하는 계약방식이다. 따라서 TOP 조건으로 체결된 에너지원에 대해서는 이미 비용이 지불된 것이기 때문에 발전운용계획 단계에서는 계약된 전량을 사용하는 것이 경제적이며 최적발전계획을 위해서는 별도의 최적화 기법이 요구된다[9].

과거의 수직통합형 체제에서는 발전운용계획이 일괄적으로 이루어지기 때문에 일반 발전기의 발전비용과 TOP 발전기의 한계발전력의 상대적 비율을 나타내는 잠재가격(shadow price) 정보를 활용하여 전체적인 발전비용 최소화를 계산할 수 있었다. 하지만 구조개편 이후에는 발전력의 결정이 시장에서 경쟁을 통해 이루어지기 때문에 TOP 발전기의 취급 방법에 대한 고찰과 운용계획의 최적화 기법에 대해서 새로운 접근이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 이에 대해 전력계통 이론과 산업조직론 및 게임이론을 사용하여 문제의 정식화에서부터 최적화 조건 그리고 전력공급전략에 대한 내쉬균형의 해법에 이르기까지를 분석하여 소개한다.

현재 우리나라의 전력시장운영규칙에는 연료제약에 대한 내용을 전력거래소에 신고하도록 규정되어 있으며 이를 반영하여 시장운영자가 전력거래량과 가격을 결정하도록 하고 있다. 이는 연료제약을 시장운영자가 처리하는 방식으로서 연료제약에 대한 전력공급자의 정확한 자료제출과 시장운영자의 합리적 결정이 전제 되어야 한다.

반면에 연료제약 문제를 전력공급자 자신이 입찰전략에서 처리하도록 하는 방식에서는 연료제약에 대한 자료제출과 시장운영자의 계산 부담의 문제가 감소하게 된다. 이와 같이 연료제약을 처리하는 두 가지 방식을 분석하고 사례연구를 통해 결과를 비교한다.

* 正 會 員 : 檀國大 電氣電子컴퓨터工學部 副敎授 · 工博
接受日字 : 2004年 4月 26日
最終完了 : 2004年 6月 25日

2. 연료제약 포함 발전력 운용계획

2.1 연료제약 문제 정식화

수직통합형 전력산업체제에서 연료제약 발전기를 포함한 발전비용 최소화 문제를 표현하기 위해 다음을 가정한다. 연료제약 발전기(G_T) 1대와 일반 발전기 N대를 대상으로 시간적 구간 J에서의 부하 패턴에 대한 최적발전력배분을 결정한다. 각 구간에서 정의되는 발전출력과 사용 연료량 등은 다음과 같다.

q_{ij} ≜ 구간 j에서 발전기 G_i 의 출력
s_j ≜ 구간 j에서 발전기 G_T의 연료투입량
F_i ≜ 발전기 Gi의 발전비용 함수
t_j ≜ 구간 j에서 발전기 G_T의 출력
D_j ≜ 구간 j에서 전력수요
n_j ≜ 구간 j에서의 시간 수
S_T ≜ 발전기 G_T의 계약연료 총량

목적함수는 전체구간(J)에서의 연료비용의 최소화이고 제약조건으로는 각 구간에서의 전력수급조건과 연료제약발전기(G_T)에서 소비되는 연료량 조건이 있다. 이를 정식화하면 다음 문제1과 같다.

[문제1]

$$\min \sum_{j=1}^{J} n_j \sum_{i=1}^{N} F_i(q_{ij}) \tag{1a}$$

$$\text{s.t.} \quad S_T = \sum_{j=1}^{J} n_j s_j \tag{1b}$$

$$D_j = t_j + \sum_{i=1}^{N} q_{ij} \qquad j=1, \ldots, J \tag{1c}$$

$$q_{imin} \leq q_{ij} \leq q_{imax}, \quad t_{\min} \leq t_j \leq t_{\max} \tag{1d}$$

목적함수에서 발전기 G_T에 대한 발전비용이 제외된 이유는 연료의 구매계약 단계에서 이미 비용이 결정되어 발전력 배분과 무관한 상수이기 때문이다. 발전기 G_T에서 소비되는 연료량과 발전력 사이의 관계인 $s_j = g(t_j)$는 일반적으로 2차함수로 정의된다. 연료비용함수(F_i) 또한 발전력(q_{ij})의 2차함수로 정의되므로 문제 (1)은 변수 q_{ij}에 대한 2차의 목적함수와 변수 t_j에 대한 2차의 제약조건, 변수 t_j 및 q_{ij}에 대한 1차의 제약조건으로 표현된다.

2.2 최적운용계획 해법

문제1에 대한 라그랑지안 함수를 나타내면 다음 식(2)와 같이 등식제약조건과 부등식제약조건이 라그랑지안 변수 λ_j, γ 와 결합되어 표현된다.

$$L = \sum_{j=1}^{J} n_j \sum_{i=1}^{N} F_i(q_{ij}) + \sum_{j=1}^{J} \lambda_j (D_j - t_j - \sum_{i=1}^{N} q_{ij}) + \gamma (\sum_{j=1}^{J} n_j s_j - S_T) \tag{2}$$

라그랑지안의 미분을 통하여 최적조건식을 구하여 정리하면 다음 식(3)과 같다.

$$\frac{dF_i(q_{ij})}{dq_{ij}} = \gamma \frac{dg(t_j)}{dt_j} \qquad i=1,\ldots,N, \quad j=1,\ldots,J \tag{3}$$

식(3)은 N×J 개의 방정식을 나타내는데 라그랑지안 변수 γ는 N×J 개의 식에서 같은 값을 갖는다. 이를 잠재가격(shadow price)이라 하며 단위 발전력 증가에 대한 연료제약 발전기의 연료량 증가와 일반 발전기의 비용증가의 비율을 의미한다. 따라서 최적조건은 한계연료소비와 한계발전비용이 모든 발전기와 모든 구간에서 일정할 때임을 알 수 있다.

또한 식(3)의 방정식과 식(1b)와 식(1c)에서의 J 개 방정식을 합하면 (N+1)×J+1 개의 방정식이 존재하는데 이는 문제1에서 결정해야하는 변수($q_{11}, \ldots, q_{NJ}, t_1, \ldots, t_J, \gamma$)의 개수와 동일하다. 따라서 연립방정식으로 해를 구할 수 있다. 계산식 중에서 식(1b)를 제외하면 모두 선형식이고 식(1b)는 2차식이다. 따라서 해를 구하기 위해 경사도법 혹은 감마 탐색법 등의 반복계산 기법이 사용된다[7].

3. 전력시장에서의 연료제약 발전기 입찰

3.1 경쟁적 전력거래의 2단계 최적화

문제1에서의 최적화는 예측된 부하패턴에 대해 모든 발전기에 대한 발전비용특성과 연료의 강제인수(TOP) 조건 등의 정보를 종합하여 발전계획을 세우는 것이다. 이는 과거의 수직통합 독점형 전력산업 구조에서 적용되는 발전운용계획법이며 가격탄력성을 갖지 않는 전력수요에 대해 완전경쟁 형태의 전력시장 모형에 적합한 해석이다.

하지만 잘 알려진 바와 같이 경쟁형 전력산업은 과점(Oligopoly) 형태를 띠기[4] 때문에 전력시장해석은 문제1과는 다르게 나타난다.

도매전력의 거래는 입찰시장에서 이루어지는데 공급과 구매의 입찰조건을 바탕으로 시장운영자(Market Operator, MO)가 거래량과 거래가격을 결정한다. 본 연구에서 공급은 입찰 파라미터를 포함하는 1차의 공급함수로 나타내고 구매는 단순히 가격탄력성을 갖는 1차의 수요함수로 정의한다. 이 때 MO는 식 (4)와 같이 사회적후생(Social Welfare, SW)이라 일컬어지는 시장거래가치를 극대화하는 조건으로부터 거래량과 가격을 결정한다.

$$max_q \ SW(q,k) = B(q) - \overline{C}(q,k) \tag{4}$$

여기서 B는 소비자의 만족가치(Benefit)를 나타내는데 이는 수요함수와 총공급량으로 계산되며, $\overline{C}$는 공급자의 입찰함수를 한계비용함수로 간주하여 계산한 유사 발전비용이다[6].

따라서 MO는 공급자가 제시한 입찰 파라미터 k에 대해 식(4)의 최적화를 통해서 최적의 발전력(q)을 결정한다. 이 때 송전용량과 발전력 등의 제약 혹은 연료의 강제인수(TOP) 조건 등이 최적화의 제약조건으로 고려된다.

한편 공급자 입장에서는 k의 선택에 따라 MO에서의 최적화 결과가 달라지고 기업의 이득이 변하기 때문에 k를 변수로 하는 이득극대화 문제를 계산하게 된다. 이를 나타내면 식 (5)와 같다.

$$max_k \ \pi(q,k) = pq - C(q,k) \tag{5}$$

여기서 p는 거래가격으로서 pq는 전력공급에 따른 매출액, C는 실제의 발전비용을 나타낸다.

공급기업이 이득을 극대화하기 위해서는 $\partial\pi/\partial k$ 식을 구해야 하는데 이 때 경쟁상대의 입찰 파라미터에 영향을 받게 되어 상호간의 입찰전략에 따라 이득이 변하는 게임 현상이 나타난다[3]. 따라서 발전기업은 최종적으로 내쉬균형(Nash Equilibrium, NE) 전략에 해당되는 입찰 파라미터를 선택하

게 된다.

또한 식(5)의 최적화를 수행하는 과정에서 거래량(q)이 식(4)를 통해 결정되므로 해를 구하기 위해서는 두 단계의 최적화 문제가 연계되어야 한다. 이러한 문제를 2단계(Bi-level) 최적화라고[10] 하며 전력시장에서 경쟁적 전력거래를 해석하기 위해 내쉬균형 전략을 구하는 과정에서 일반적으로 나타나는 문제이다.

3.2 시장운영자의 연료제약 처리

연료제약 발전기의 의무인수(TOP) 조건이 반영되는 급전계획을 수립하기 위해서는 TOP 조건을 고려하는 주체가 정의되어야 한다. 공급자가 TOP 조건을 MO에게 제출하도록 시장규칙을 정의한다면 MO는 식(4)의 계산과정에서 TOP 조건을 제약조건에 포함시켜야 한다. 따라서 MO의 계산부담이 증가하고 시장참여자들의 급전계획 결과에 대한 이해가 다소 난해해진다.

반면 TOP 조건을 MO에 제출하지 않고 공급자가 자체적으로 고려하도록 하는 방식도 가능하다. 본 연구에서는 이러한 두 가지 방식에서의 해석기법과 결과를 비교한다.

최적조건의 수식유도를 위해 다음을 가정한다. 공급자는 P_1과 P_2, 2인이고 P_1은 일반 발전기 G_1과 연료제약발전기 G_T를, P_2는 일반 발전기 G_2를 소유한다. 발전기 G_1과 G_2의 발전비용특성은 각각 $b_1+m_1q_1$, $b_2+m_2q_2$의 한계비용으로 정의하고, G_T의 연료특성은 $s=g(t)=b_t t+0.5\,m_t t^2$와 같이 발전력에 대한 2차함수로 정의한다. 한편 부하패턴은 구간 j에서 수요함수 $b_{0j}-m_{0j}d_j$ 로 정의하는데 이 때 d_j는 부하전력으로서 공급전력인 $q_{1j}+t_j+q_{2j}$와 동일하다.

입찰과정에서 G_1과 G_2의 입찰함수는 1차함수의 절편을 전략 파라미터(k)로 사용하는 것으로 정의한다. 따라서 MO에 제출된 입찰함수는 각각 $k_1+m_1q_1$, $k_2+m_2q_2$이 된다.

MO가 TOP 조건을 처리하는 경우, 식(4)의 목적함수와 연료제약 조건을 포함한 라그랑지안을 나타내면 다음 식(6)과 같다.

$$L=\sum_{j=1}^{J}[B(q_{1j}q_{2j}t_j)-\overline{C}(q_{1j}q_{2j}t_jk_{1j}k_{2j})]+\gamma[S_T-\sum_{j=1}^{J}g(t_j)] \tag{6}$$

이에 대해 라그랑지안의 편미분을 계산하면 다음과 같다.

$$\partial L/\partial q_{1j}=b_{0j}-m_{0j}(q_{1j}+q_{2j}+t_j)-(k_{1j}+m_1q_{1j})=0 \tag{7a}$$

$$\partial L/\partial q_{2j}=b_{0j}-m_{0j}(q_{1j}+q_{2j}+t_j)-(k_{2j}+m_2q_{2j})=0 \tag{7b}$$

$$\partial L/\partial t_j=b_{0j}-m_{0j}(q_{1j}+q_{2j}+t_j)-\gamma\ \partial g(t_j)/\partial t_j=0 \tag{7c}$$

(j=1, ..., J)

따라서 모든 구간에서 한계연료소비와 시장가격의 비가 일정한 값 $\gamma=p_j/(\partial g/\partial t_j)$일 때 최적이 됨을 알 수 있다. 위의 식(7)은 변수 q_{1j}, q_{2j}, t_j 에 대한 선형식으로 나타나지만 추가변수인 잠재가격 γ 를 구하기 위해서는 t_j의 2차식으로 나타나는 식(1b)를 동시에 계산해야 한다.

3.3 시장참여자의 연료제약 처리

연료제약에 대한 조건을 전적으로 발전사업자 자신이 처리하도록 한다면 MO는 연료제약을 고려할 필요 없이 식(4)의 시장거래가치 극대화만을 계산하면 된다. 반면 TOP 조건의 발전기로 공급입찰에 참여하는 사업자는 실질적인 이득 극대화를 위해 식(5)의 목적함수 뿐 아니라 자신의 TOP 조건을 제약조건으로 포함시켜 최적화를 수행해야 한다.

TOP 조건 발전기에 대해서 발전기업은 적절한 입찰 전략을 사용해야 하는데 본 연구에서는 발전기 G_T의 출력과 발전기 G_1 출력의 합을 대상으로 하는 입찰함수를 사용한다. 즉 참여자 P_1은 G_T와 G_1의 출력 합($q_t=q_1+t$)에 대해 $k_1+m_1q_t$의 형태로 입찰 전략을 세운다.

MO가 전력거래의 결정 과정에서 계산하는 식(4)의 사회적 후생(SW)을 살펴보면 다음과 같다.

$$SW(q,k)=\sum_{j=1}^{J}[B(q_t,q_2)-\overline{C}_1(q_t,k_1)-\overline{C}_2(q_2,k_2)] \tag{8}$$

이에 대한 최적조건의 유도는 다음 식(9)와 같다.

$$\partial SW/\partial q_{tj}=b_{0j}-m_{0j}(q_{tj}+q_{2j})-(k_{1j}+m_1q_{tj})=0 \tag{9a}$$

$$\partial SW/\partial q_{2j}=b_{0j}-m_{0j}(q_{tj}+q_{2j})-(k_{2j}+m_2q_{2j})=0 \tag{9b}$$

참여자 P_1과 P_2가 제시한 입찰함수에 대해서 MO가 전력거래량(q_t, q_2)을 결정하는데 필요한 식은 위의 식(9)이다. 입찰시장에서 전략적 거래를 해석하기 위해서는 MO 단계에서의 최적화 뿐만 아니라 기업 단위에서의 최적화가 동시에 계산되어야 한다. 참여자 P_1의 이득극대화 계산을 위해 TOP 조건이 포함된 라그랑지안을 나타내면 다음 식(10)과 같다.

$$L_1=\sum_{j=1}^{J}[p_jq_{tj}-C_1(q_{1j})]+\gamma[S_T-\sum_{j=1}^{J}g(t_j)] \tag{10}$$

이에 대한 최적조건의 유도는 다음 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned}\partial L_1/\partial t_j&=p_j\partial q_{tj}/\partial t_j-\partial C_1/\partial q_{1j}\cdot\partial q_{1j}/\partial t_j-\gamma\partial g(t_j)/\partial t_j=0\\&=0+\partial C_1/\partial q_{1j}-\gamma\partial g(t_j)/\partial t_j=0\end{aligned} \tag{11}$$

여기서 q_{tj}는 입찰 파라미터 k에 따라 식(9)에 의해 결정되기 때문에 $\partial q_{tj}/\partial t_j=0$이고 따라서 $\partial q_{1j}/\partial t_j=-1$ 이다.

식(11)을 정리하면 $\gamma=(\partial C_1/\partial q_{1j})/(\partial g/\partial t_j)$ 로서 모든 구간에서 한계연료소비와 한계발전비용의 비가 일정한 값(γ)일 때 최적이 됨을 알 수 있다.

4. 내쉬균형전략의 해법

4.1 내쉬균형을 위한 조건식

경쟁적 전력거래에서 내쉬균형전략을 구하기 위해서는 상대방의 전략에 대한 최적대응함수를 구해야 한다. 최적대응이란 이득함수를 전략 파라미터 k로 미분하여 영이 되는 k의 값을 말한다.

시장운영자가 연료제약을 처리하는 경우, P_1과 P_2의 최적대응함수는 다음 식(12)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}\partial\pi_1/\partial k_{1j}&=\partial[p_j(q_{1j}+t_j)-C_1(q_{1j})]/\partial k_{1j}\\&=q_{1j}+t_j+[k_{1j}-b_1+m_1(q_{1j}+t_j)]\partial q_{1j}/\partial k_{1j}+(k_{1j}+m_1q_{1j})\partial t_j/\partial k_{1j}\\&=q_{1j}+t_j+[k_{1j}-b_1+m_1(q_{1j}+t_j)]\partial q_{1j}/\partial k_{1j}=0\end{aligned} \tag{12a}$$

$$\begin{aligned}\partial\pi_2/\partial k_{2j}&=\partial[p_jq_{2j}-C_2(q_{2j})]/\partial k_{2j}\\&=q_{2j}+[k_{2j}-b_2+m_2q_{2j}]\partial q_{2j}/\partial k_{2j}=0\end{aligned} \tag{12b}$$

식(12a)에서 $\partial t_j/\partial k_{1j}=0$ 인데 그 이유는 다음과 같이 연료제약조건식을 미분하면 알 수 있다.

$$\partial[S_T-\sum_{j=1}^{J}g(t_j)]/\partial k_{1j}=-\partial g(t_j)/\partial k_{1j}=-(b_t+m_tt_j)\partial t_j/\partial k_{1j}=0,$$

(j=1, ... J)

내쉬균형은 게임 참여자들의 최적대응전략이 동시에 만족하는 상태이므로 식(12a)와 (12b)를 동시에 계산해야 하며 이때 단계1에서 MO의 최적화 조건인 식(7)도 함께 계산함으로서 전체 최적조건식을 유도할 수 있다.

한편 시장참여자가 연료제약을 처리하는 경우, P_1과 P_2의 최적대응함수는 다음 식(13)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}\partial L_1/\partial k_{1j} &= \partial[p_j(q_{1j}+t_j) - C_1(q_{1j}) - \gamma g(t_j)]/\partial k_{1j} \\ &= q_{1j}+t_j+[k_{1j}+2m_1(q_{1j}+t_j)]\partial(q_{1j}+t_j)/\partial k_{1j} \\ &\quad -(b_1+m_1q_{1j})\partial q_{1j}/\partial k_{1j} - \gamma(b_t+m_tt_j)\partial t_j/\partial k_{1j} = 0\end{aligned} \tag{13a}$$

$$\begin{aligned}\partial\pi_2/\partial k_{2j} &= \partial[p_j q_{2j} - C_2(q_{2j})]/\partial k_{2j} \\ &= q_{2j}+[k_{2j}-b_2+m_2q_{2j}]\partial q_{2j}/\partial k_{2j} = 0\end{aligned} \tag{13b}$$

여기서 $\partial t_j/\partial k_{1j} \neq 0$ 임에 주의할 필요가 있다. 식(12a)에서는 연료제약조건을 MO에서 만족시키므로 k_{1j}의 변화에 대해서도 연료사용량 합은 변화가 없지만 시장참여자가 처리하는 경우에는 그렇지 않다.

4.2 2단계 최적화의 해법

전력시장에서의 전력거래는 MO와 거래 참여자 모두의 전략이 균형을 이루는 상태에서 이루어진다. 따라서 MO가 처리하는 경우의 최적조건식은 식(7)과 식(12)를 연립함으로서 다음 식(14)와 같이 정리된다.

$$\begin{pmatrix} m_{0j}+m_1 & m_{0j} & m_{0j} & 1 & 0 \\ m_{0j} & m_{0j} & m_{0j}+m_2 & 0 & 1 \\ m_{0j} & m_{0j}+\gamma m_t & m_{0j} & 0 & 0 \\ 1+m_1d_{1j} & 1+m_1d_{1j} & 0 & d_{1j} & 0 \\ 0 & 0 & 1+m_2d_{2j} & 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} q_{1j} \\ t_j \\ q_{2j} \\ k_{1j} \\ k_{2j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{0j} \\ b_{0j} \\ b_{0j}-\gamma b_t \\ b_1d_{1j} \\ b_2d_{2j} \end{pmatrix} \tag{14a}$$

$j=1, \ldots, J$

$$S_T = \sum_{j=1}^{J} g(t_j) \tag{14b}$$

여기서 $d_{1j} = \partial q_{1j}/\partial k_{1j} = -(m_{0j}+m_2)/\triangle$, $d_{2j} = \partial q_{2j}/\partial k_{2j} = -(m_{0j}+m_1)/\triangle$, $\triangle = m_{0j}m_1 + m_1m_2 + m_2m_{0j}$ 이다. 이러한 미분항의 유도는 식(7)로부터 구할 수 있다.

전체식의 개수는 5J+1 인데 (14b)식 1개를 제외하면 모두 선형식이다. 변수로는 각 구간에서 발전력 3개와 입찰 파라미터 2개, 그리고 잠재가격 γ가 전체구간에서 공통이므로 개수는 5J+1 이다. 본 연구에서 계산과정은 식(14a)를 이용하여 t_j를 구한 후 식(14b)의 오차를 계산하여 오차가 감소하도록 γ 를 수정하는 γ 반복법[7]을 사용한다. 물론 이 때의 값이 식(1d)에서의 부등식 조건을 만족함이 전제된 것이다.

한편 시장참여자가 제약조건을 처리하는 경우의 최적조건은 식(9), (11), (13)을 연립함으로서 다음 식(15)와 같이 정리된다.

$$\begin{pmatrix} m_{0j}+m_1 & m_{0j}+m_1 & m_{0j} & 1 & 0 \\ m_{0j} & m_{0j} & m_{0j}+m_2 & 0 & 1 \\ m_1 & -\gamma m_t & 0 & 0 & 0 \\ M_1 & M_2 & 0 & d_{1j}+d_{tj} & 0 \\ 0 & 0 & 1+m_2d_{2j} & 0 & d_{2j} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} q_{1j} \\ t_j \\ q_{2j} \\ k_{1j} \\ k_{2j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{0j} \\ b_{0j} \\ -b_1+\gamma b_t \\ b_1d_{1j}+\gamma b_td_{tj} \\ b_2d_{2j} \end{pmatrix}$$

$j=1, \ldots, J$ (15a)

$$S_T = \sum_{j=1}^{J} g(t_j) \tag{15b}$$

여기서 $M_1 = 1 + m_1d_{1j} + 2m_1d_{tj}$, $M_2 = 1 + 2m_1d_{1j} + 2m_1d_{tj} - \gamma m_td_{tj}$ 이고 $d_{tj} = \partial t_j/\partial k_{1j} = -m_{0j}(m_{0j}+2m_2)/(\gamma m_t\triangle)$, $d_{2j} = \partial q_{2j}/\partial k_{2j} = -(m_{0j}+m_1)/\triangle$, $d_{1j} = -(m_{0j}+m_2)/\triangle - d_{tj}$, $\triangle = m_{0j}m_1 + m_1m_2 + m_2m_{0j}$ 이다. 이러한 미분항은 식(9)와 식(11)로부터 유도된다.

앞의 식(14)에서와 같이 잠재가격 γ가 포함되어 계산과정은 식(14)를 계산할 때와 동일하다. 하지만 식(15)에서의 잠재가격과 식(14)에서의 잠재가격의 의미는 서로 다르기 때문에 γ 는 다른 값을 갖는다.

5. 사례연구

5.1 적용대상의 시장특성

본 연구의 적용은 앞의 3.2절에서와 같이 참여자는 2인(P_1,P_2), P_1은 일반 발전기 G_1과 연료제약발전기 G_T를, P_2는 일반 발전기 G_2를 갖는 전력시장에 대해 수행하였다. 각 발전기에 대한 발전비용 특성과 연료 특성은 다음 표1과 같은 2차함수로 정의한다. G_T의 계약된 연료 총량 S_T는 1500으로 설정한다.

표 1 사례적용 발전기의 발전비용과 연료량 특성
Table 1 Generation Cost and Fuel Consumption Functions

구분	특성	함수형태	계수(b)	계수(m)
발전기 #1 (G_1)	발전비용	$b_1q_1+0.5m_1q_1^2$	$b_1=10$	$m_1=0.25$
발전기 #2 (G_2)	발전비용	$b_2q_2+0.5m_2q_2^2$	$b_2=5$	$m_2=0.45$
연료제약 발전기 (G_T)	연료 사용량	$b_tt+0.5m_tt^2$	$b_t=4$	$m_t=0.02$

한편 부하의 시간별 변화를 나타내는 부하패턴은 가격탄력성을 반영하기 위해 다음 표2와 같이 구간별 변동 수요함수로 설정한다. 구간 j에서의 수요함수는 부하전력 d_j와 시장가격 p_j에 대해 $p_j = b_{0j} - m_{0j}d_j$로 정의하며 구간은 전체 8개이고 편의상 한 구간은 한 시간으로 정의한다.

표 2 구간별 수요함수
Table 2 Load Pattern by Periodic Demand Functions

구간(j)	1	2	3	4	5	6	7	8
b_{0j}	170	220	190	150	90	70	120	170
m_{0j}	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6	0.7	0.4	0.5

5.2 연료제약을 고려한 균형점 해석 결과

위의 표1과 2로 표현되는 공급과 수요 특성에 대해서 연료제약을 시장운영자가 고려하는 경우(이하 방식1)의 내쉬균형상태를 식(14)에 기초하여 계산하면 다음 표3과 같다.

표 3 시장운영자 처리(방식1)의 계산 결과
Table 3 Results of Market Operator's Treatment (Case 1)

구간(j)	1	2	3	4	5	6	7	8
q_{1j}	89.473	104.83	120.47	88.394	47.218	30.231	91.37	89.473
t_j	34.808	112.07	110.11	14.881	0	0	0	34.808
q_{2j}	92.113	127.75	130.67	83.608	46.205	32.857	78.151	92.113
k_{1j}	39.435	55.932	51.505	34.46	22.142	18.281	29.349	39.435
k_{2j}	20.352	24.653	22.819	18.935	13.154	11.053	17.023	20.352
p_j	61.803	82.14	81.623	56.558	33.946	25.838	52.191	61.803
π_{1j}	5785.5	15394	15802	3980.4	852	364.57	2811.5	5785.5
π_{2j}	3323.2	6182.6	6170.6	2737.9	857.11	441.78	2313.9	3323.2

표 3에서 항목은 순서대로 G_1의 발전력, G_T의 발전력, G_2

의 발전력, G_1의 전략파라미터, G_2의 전략파라미터, 시장가격, G_1의 이득, G_2의 이득을 나타낸다. 음영으로 표시된 $k_{1j}\,k_{2j}$ 항은 참여자 P_1과 P_2의 전략변수로서 내쉬균형 전략에 해당된다.

발전기 G_T의 발전력 t_j를 보면 구간 5-6-7에서 영으로 계산되는데 그 이유는 구간별 잠재가격을 조사하면 알 수 있다. 구간 8개에서의 잠재가격 $\gamma = p_j/(\partial g/\partial t_j)$은 13.16 13.16 13.16 13.16 <u>8.49</u> <u>6.46</u> <u>13.05</u> 13.16로 계산된다. 다른 구간에서 잠재가격은 13.16으로 동일하지만 구간 5-6-7에서는 이보다 작은 값을 보인다. 잠재가격의 경제학적 의미에서 볼 때 5-6-7 구간에서 G_T 연료의 가치가 다른 구간에 비해 낮다.

따라서 이 구간에서의 연료소비를 줄이고 다른 구간에서 소비량을 증가시키는 것이 유리하며 이런 이유로 발전력 $t_5\,t_6\,t_7$의 값은 영이 되어 더 이상 낮출 수 없는 상태가 되는 것이다.

다음은 연료제약 조건을 시장참여자 중 P_1이 자체적으로 반영하는 경우(이하 방식2)이다. 식(15)를 기초로 내쉬균형 전략과 거래의 실적을 계산하면 다음 표4와 같다.

표 4 시장참여자 처리(방식2)의 계산 결과

Table 4 Results of Market Producer's Treatment (Case 2)

구간(j)	1	2	3	4	5	6	7	8
q_{1j}	87.79	117.48	123.91	81.352	42.106	21.46	78.478	87.79
t_j	37.31	92.438	104.39	25.355	0	0	20.017	37.31
q_{2j}	91.746	130.53	131.44	82.072	48.706	37.459	75.312	91.746
k_{1j}	30.302	31.343	24.997	28.934	24.986	23.392	25.853	30.302
k_{2j}	20.291	25.082	22.924	18.679	13.595	11.9	16.587	20.291
p_j	61.577	83.821	82.074	55.611	35.513	28.757	50.477	61.577
π_{1j}	5862	14695	15580	4293.3	852.63	344.95	3417.1	5862
π_{2j}	3296.8	6455	6243.5	2638.2	952.39	574.19	2148.8	3296.8

구간 8개에서의 잠재가격 $\gamma = (\partial C_1/\partial q_{1j})/(\partial g/\partial t_j)$은 6.73 6.73 6.73 6.73 <u>5.13</u> <u>3.84</u> 6.73 6.73로 계산된다. 이 때에도 구간 5-6에서의 잠재가격이 다른 구간의 값보다 작게 나타나므로 그 때의 발전력 $t_5 t_6$의 값은 낮추고 다른 구간의 출력을 증가시켜야 한다. 따라서 $t_5 t_6$의 값을 최대로 낮춘 영인 상태가 최적이 된다.

5.3 두 방식의 결과 비교

앞에서의 표3과 4에서 입찰전략변수 $k_1\,k_2$의 구간별 변화를 보면 P_2의 경우 두 방식에서 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 하지만 P_1의 경우는 구간 5-6을 제외하고는 방식1에서의 값이 방식2에서의 값보다 상당히 큰 값을 갖는다. 이는 P_1이 방식1에서는 G_1만을 대상으로 입찰하고 방식2에서는 G_1과 G_T 모두를 대상으로 입찰하기 때문이다. 구간 5-6에서는 방식2에서 G_T의 발전을 포기하고 입찰하기 때문에 방식1의 결과와 유사한 값을 나타낸다.

방식1에서 P_1은 q_{1j}만을 고려하고 t_j 는 시장운영자가 결정한다. 하지만 방식2에서는 P_1이 q_{1j} t_j 모두를 고려하는 전략을 세워야 하기 때문에 둘 사이의 전력배분이 중요한 사항이 된다. 다음 그림1은 이러한 P_1의 전력배분 결과를 비교한 것이다. 전력이 배분된 비율은 $t_j/(q_{1j}+t_j)$로 계산하였다. 발전사업자가 직접 연료제약 발전기의 발전계획을 수립한 것(방식2)과 MO에서 계획한(방식1) 결과가 구간별로 차이가 있음을 알 수 있다.

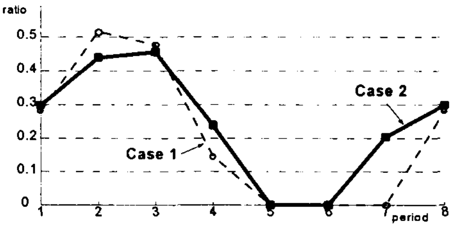

그림 1 연료제약 발전기 출력의 담당 비율

Fig. 1 Ratio of G_T's Output among P_1's Generation

연료제약 발전기의 연료사용량은 출력 t_j의 함수로 표현되며 이를 8개 구간에 대해 누적시켜 계산하면 다음 그림2와 같다. 방식1은 MO에서 계획한 연료사용량이고 방식2는 발전사업자가 직접 계획한 것이다. 구간8에서 총연료량 1500에 도달함을 알 수 있다.

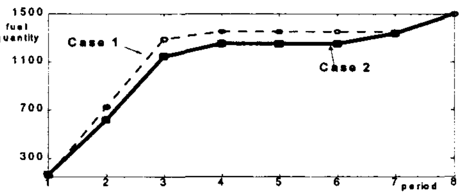

그림 2 연료사용량의 증가추세

Fig. 2 Accumulation of Fuel Consumption

이와 같이 두 참여자의 입찰전략과 TOP 발전기의 연료사용 패턴 등이 두 방식에서 차이를 분명하게 보이는 반면, 각 구간에서의 발전력과 시장가격은 큰 차이를 보이지 않는다. 다음 그림3은 각 구간에서의 전력거래량과 시장가격을 두 방식에 대해 비교한 것이다. 그림에서 점선이 방식1을, 실선이 방식2를 나타낸다.

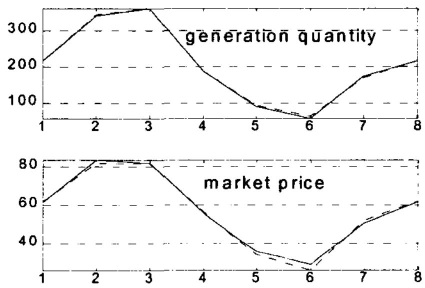

그림 3 전력거래량과 시장가격

Fig. 3 Generation Quantities and Market Prices

전력시장에서 거래되는 전력량과 가격이 이와 같이 유사하게 나타나는 것은 사회적 후생 측면에서 두 방식이 큰 차이가 없음을 의미한다. 이러한 특성을 정량적으로 나타내면 다음 표5와 같다. 기업의 이득, 소비자효용(Benefit) 등을 8개 구간에 대해서 합산한 것이며 변화율은 방식1을 기준으로 방식2의 증가분을 상대적 수치로 나타낸 것이다.

표 5 사회적 후생과 기업이득의 비교

Table 5 Comparisons of Social Welfare and Firm's Profit

구분	P1의 이득	P2의 이득	소비자 효용	발전비용	사회적 후생
방식1	50776	25350	193999	32637	161362
방식2	50907	25606	193705	32447	161258
변화율(%)	+0.258	+1.01	-0.151	-0.58	-0.064

여기서 기업의 이득은 식(5)에 의해, 소비자효용은 수요함수를 적분하여, 발전비용은 비용함수에 의해 계산되고, 사회적 후생은 식(4)에 의해 계산된다.

표5에 의하면 기업이 자체적으로 TOP 조건을 해소하는 경우에 기업 이득이 전반적으로 소폭 증가하며 소비자효용(만족가치)과 발전비용은 소폭 감소한다. 하지만 사회적 후생은 거의 변동이 없음을 나타낸다. 따라서 소비자 잉여(surplus) 면에서는 방식2의 경우에 감소함을 알 수 있다.

전력거래를 결정할 때의 목적인 시장거래가치 극대화라는 측면에서 보면 두 방식에서 큰 차이가 나지 않는다. 따라서 시장운영자가 처리하는 경우의 문제점인 TOP 계약의 정확한 자료 제출, 제약처리 계산에 대한 부담, 제약처리의 공정성 논란 등을 해소하기 위해서 TOP 조건의 처리를 발전사업자 각자에게 맡기는 방식도 시장거래가치 면에서는 의미 있는 것으로 판단된다.

6. 결 론

전력시장해석과 전력공급자 입찰전략의 분석에서 LNG 등의 연료제약 조건이 포함되는 경우 이에 대한 수리적 모형과 해법, 그리고 사례연구의 분석을 제시하였다.

수직통합형 발전비용 최소화 문제에서 강제인수(Take-of-Pay) 조건은 전 구간에서 잠재가격이 일정한 상태가 최적상태임을 의미한다. 하지만 경쟁적 발전입찰시장에서는 시장운영자와 발전사업자가 추구하는 최적화 대상이 다르기 때문에 새로운 수리모형이 필요하다. 본 연구에서는 입찰시장을 공급함수 모형으로 등가화하여 시장운영자의 시장거래가치 극대화, 각 공급자의 이득극대화가 동시에 만족되는 내쉬균형 상태의 계산 기법을 소개하였다.

현재 우리나라 전력시장에서는 연료의 강제인수 조건을 시장운영자에게 제출하고 시장운영자가 이를 고려하여 전력거래를 결정하는 방식을 택하고 있다. 하지만 강제인수 계약의 정확한 자료 제출, 제약조건처리에 대한 계산부담, 제약처리의 정확성과 공정성 논란, 등 어려운 문제가 뒤따른다.

본 연구에서는 강제인수 조건을 입찰참여자 각자가 해소하는 모형을 수립하여 내쉬균형을 계산하고 결과를 시장운영자가 처리할 때와 비교하였다. 발전기업의 이득이 증가하고 소비자의 잉여가 감소하지만 시장거래가치 면에서는 큰 차이가 없음을 확인하였다. 대규모 입찰시장에 대해서 시장운영자가 연료제약조건 처리의 방식을 검토할 때 유용한 자료로 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (02-전-01) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] 박정욱, "전력산업 구조개편," http://www.mocie.go.kr/policy /business project/2002/2002_5-11.pdf, 2002. 5.

[2] 한국전력거래소, 전력시장운영규칙, http://www.kpx.or.kr, 2003.11.

[3] 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.

[4] S. Borenstein, J. Bushnell, E. Kahn, and S. Stoft, "Market Power in California Electricity Market," Utility Policy, Vol.5, No.3, pp.219-236, 1995.

[5] J. D. Weber and T. J. Overbye, "A Two-Level Optimization Problem for Analysis of Market Bidding Strategies," IEEE PES Summer Meeting, Vol.12, pp.682-687, 1999.

[6] Y. He and Y. H. Song, "The Study of the Impacts of Potential Coalitions on Bidding Strategies of GENCOs," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.18, No.3, pp.1086-1093, August 2003.

[7] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, Inc. 1996.

[8] K.P. Wong, "Combined Genetic Algorithm/Simulated Annealing/Fuzzy Set Approach to Short-Term Generation Scheduling with Take-Or-Pay Fuel Contract," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.11, No.1, pp. 128-133, February 1996.

[9] Peter Fox-Penner, Electric Utility Restructuring: A Guide to the Competitive Era, Public Utilities Reports, Inc. Vienna, Virginia, 1997.

[10] Z. Q. Luo, J. S. Pang, and D. Ralph, Mathematical Programs with Equilibrium Constraints, N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1996.

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