게임이론을 적용한 전력시장 전력거래방식의 후생 측면 비교 연구

論 文
52A-10-9

A Comparative Welfare Analysis on the Trading System in an 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. The trading system in an electricity market has been one of the most important issues in deregulated electricity market. This paper deals with comparisons of the major two types of the trading system: compulsory pool market and bilateral contract market. The two trading systems are compared quantitatively from the viewpoint of consumer's surplus and social welfare. This paper, also, proposes a unified model of Cournot and Bertrand for analyzing the mixed trading system of pool market and bilateral contract market. Nash equilibrium of the unified model is derived by criteria for participating in bilateral contract market. Numerical results from a sample case show that a mixed trading system of pool market and price-competitive bilateral market is beneficial to consumer from the view points of consumer's surplus.

Key Words : Electric Power Market, Bimatrix Game, Payoff Matrix, Mixed Strategy, Nash Equilibrium

1. 서 론

전력생산과 유통과정에 경쟁을 도입하여 소비자에게 저렴하고 질높은 서비스를 제공하고자 하는 노력이 현재 국내외 전력산업에서 활발히 진행되고 있다. 기존의 여러 산업에 구조개편이 도입되어 효율성과 경제성 면에서 성공을 거둔 바 있지만 그러한 기술과 경험이 전력산업에는 쉽게 적용되지 못하고 있다. 전기현상과 전력산업이 갖는 특징으로 인해 전력시장이 일반적인 상품시장과는 크게 다르기 때문이다[1].

전기현상에서 에너지를 저장할 수 없는 특성과 전류의 흐름을 인위적으로 조절하지 못하는 특성은 전력시장의 설계에 각별한 주의를 요하는 원인이 된다[2]. 전력거래의 방식과 가격의 결정, 정산방식, 보조서비스 공급, 위험회피, 시장지배력 억제 등등 전력시장과 관련된 많은 분야에서 전기현상과 공정한 경쟁이 고려되는 복잡하고 민감한 과제들이 발생된다. 본 연구에서는 전력시장에서 핵심과제 중의 하나인 전력거래 방식에 대해 정량적인 비교분석을 시도한다.

전력거래 방식은 크게 전력 풀(pool)시장 거래와 쌍방계약(bilateral contract) 거래로 구분된다. 풀시장 방식은 전력거래를 희망하는 모든 판매자와 구매자에게 의무적으로 전력풀이라는 시장에서만 거래가 허용되는 방식으로 강제적(compulsory) 혹은 의무적 풀이라고도 한다. 반면에 풀시장을 거치지 않고 판매와 구매자 사이에 직접 거래가 형성되는 방식을 자발적(voluntary) 풀이라고 하며 양쪽의 거래계약에 의해 이루어지기 때문에 쌍방계약 방식이라고도 한다[3].

강제적 풀시장과 쌍방계약시장에 대한 특성의 비교 분석은 여러나라에서 다양하게 수행되고 있다[4-8]. 현재까지 알려진 강제적 풀 방식의 장점은 다음과 같다. 우선 거래가 중앙에 집중됨으로서 경제급전의 원리가 적용되어 전반적인 효율성이 향상된다. 계통운영자에 의한 전력계통 안전성 유지가 용이하다. 시장가격이 자연스럽게 결정되어 설비투자 등의 경제성 지표로 활용된다. 전력시장 신규 참여자에게 유리하다. 이러한 장점으로 우리나라에서는 강제적 풀방식을 채택하고 있다[5].

반면 풀방식의 단점이자 쌍방계약 방식의 장점은 다음과 같다. 시장참여자에게 거래의 자율권을 부여함으로서 규제완화(deregulation)라는 기본 취지에 부합된다. 거래량과 거래가격이 쌍방계약에 의해 결정되므로 시장운영 기능의 복잡성이 완화된다. 위험회피(risk hedging)를 위한 계약시장이 원활하게 형성되어 시장안정화에 도움이 된다. 계통설비의 용량제약에 의한 시장지배력(market power)의 발생이 자유로운 계약시장에 의해 감소한다. 전력공급자의 전략적 행동이 약화되어 소비자의 잉여(surplus)와 사회적 후생(social welfare)이 증가한다[4,5].

전력거래방식에 대한 종합적 우열의 비교 판정은 어려운 문제이다. 나라마다 산업구조가 다르고 발전원의 구성과 시장운영 규칙 등이 다르기 때문이다. 하지만 '경쟁에 의한 소비자 이익의 증가'라는 기본 목표를 위해서는 시장의 효율성과 관련된 여러 가지 측면에서 구체적이고 정량적인 비교 연구가 수행되어야 한다. 시장 효율성의 평가기준으로는 시장지배력 약화, 가격의 안정성, 사회적 후생 등이 있다[3]. 본 연구에서는 두 가지 방식에 대해 소비자 잉여와 사회적 후생을 게임이론의 균형점(equilibrium) 해석을 통해 정량적으로 비교한다.

국가마다 전력거래방식에 차이가 있지만 대체로 남미국가는 강제적 풀방식을, 유럽 국가는 쌍방계약 방식을 채택하고, 미국의 여러 전력시장에서는 두 방식이 혼합된 방식을 포함하여 다양하게 구성되어 있다[4]. 하지만 그간의 전력시장 운

* 正 會 員 : 檀國大 電氣電子컴퓨터工學部 副敎授·工博
接受日字 : 2003年 2月 18日
最終完了 : 2003年 8月 22日

영 경험과 이론적인 분석을 통해 세계적으로 현재 점진적인 변화가 일고 있다. 그 변화의 추세는 강제적 풀 방식에서 쌍방계약 방식으로의 변환이다. 영국과 호주의 시장구조가 그러하며 미국의 일부에서도 이러한 변화가 진행 중이다[5,8].

Bunn[4]의 연구에서는 전력거래에서의 두가지 방식과 정산방식에서의 차등가격(discriminatory price), 동일가격(uniform price) 방식이 조합된 경우에 대해 종합적 특성의 비교 분석을 시도하였다. 하지만 이론적 근거가 미약한 대리인 모형(agent-based model)을 사용하기 때문에 연구결과를 일반화시키기에는 무리가 있다. 혼합형 거래방식에 대한 연구[6]에서는 풀시장과 쌍방계약이 결합된 시장구조에서 판매자와 구매자의 거래전략을 최적화 개념으로 분석하였다. 하지만 거래의 균형점 해석이 이루어지지 않고 개별 거래 참여자의 전략관리를 대상으로 하기 때문에 시장구조의 특성을 파악하지 못한다.

쌍방계약 구조에서 입찰전략의 내쉬 균형점을 해석한 연구[7]도 발표되었으나 복합전략(mixed strategy)을 고려하지 못한 약점이 있고 두 방식의 비교가 시도되지는 않았다. 미국의 Hogan 교수는 일찍이 풀시장과 계약시장이 상호 모순적인 것이 아니고 보완적이기 때문에 두 방식의 조화가 이루어져야 한다고 주장하였다[8]. 하지만 구체적이고 정량적인 접근이 되지 못해 단순한 의견 수준을 넘지 못하였다.

전력시장에서의 계약시장은 현물시장(spot market)에서의 계약과 위험회피를 위한 선도거래, 선물거래 등이 있다[3]. 계약시장이 시장의 효율성에 어떤 영향을 미칠지는 가격이 결정되는 특성에 달려있다. 위험회피 계약을 포함한 계약시장 방식에 대해 Hogan 교수는 계약시장에서의 가격이 풀시장 가격보다 항상 낮은 것은 아니므로 무조건적 계약시장 도입에 주의를 준 바 있다[9]. Cournot와 Bertrand 모형을 사용해서 계약시장의 균형점을 분석하고 가격 특성을 분석한 연구[10]와 부하를 확률적 모형으로 두고 현물가격 기대값과 계약가격을 비교분석한 연구[11]도 발표된 바 있다. 하지만 본 연구는 일정시점을 기준으로 현물시장에서의 쌍방계약 방식과 강제적 풀시장 방식을 후생측면에서 비교하는 것이다.

본 논문에서는 전력 풀시장에서의 거래를 Cournot 모형으로 해석하고 내쉬균형점에서의 후생을 분석한 후, 쌍방계약 방식과 풀시장이 혼합되는 경우의 균형점 해석을 시도하고 후생의 변화를 비교한다. 또한 계약시장에 경쟁이 도입되는 경우를 Bertrand 가격경쟁 모형으로 해석함으로써 계약시장과 풀시장의 결합을 Cournot와 Bertrand의 결합 모형으로 해석하여 거래방식에 따른 후생의 차이를 분석한다.

2. 전력 풀시장 해석

2.1 강제적 풀시장의 특징

전력 풀시장이란 전력 판매자와 구매자 사이에 적정 가격에서 수요와 공급이 일치되도록 거래를 성사시키는 시장이다. 거래 참여자들 사이의 직접거래를 허용하지 않고 판매와 구매 전력을 중앙에서 집중 관리한다. 이때의 가격을 청산(clearing)가격이라 하며 판매자의 입찰가격 중에서 거래가 허용되는 가장 높은 가격으로 정의된다[3]. 따라서 전력의 판매가격은 특정 구매자와의 계약으로 형성되는 것이 아니고 풀시장에서 보유한 수요와 공급의 특성에 의해 결정된다.

전력도매시장이 과점(oligopoly) 형태로 나타난다는 것은 잘 알려진 사실이다[2]. 따라서 판매회사는 전력 풀시장에서의 가격 형성에 영향을 줄 수 있으며 판매이득을 극대화하기 위한 전략을 구사하게 된다. 전력회사 i(이하 F_i)의 이득은 $\pi_i = p \cdot q_i - C_i(q_i)$로 표현되며 여기서 p는 시장가격, q는 판매량, C는 발전비용함수이다.

전체 전력이 풀시장에서만 거래되는 경우에도 계통의 용량제약에 의해 모선에 따라 가격이 다르게 나타날 수 있다. 하지만 이와 같은 시장지배력의 발생은 본 연구에서 제외되므로 풀시장에서의 시장가격은 동일한 것으로 가정한다. 따라서 시장가격은 n개의 판매자가 있는 경우 다음과 같이 수요함수 g로 표현된다. $p = g(q_1 + q_2 + \cdots + q_n)$.

2.2 풀시장의 Cournot 모형 해석

산업조직(industrial organization) 분야에서 사용되는 시장해석 모형 중, 본 연구에서는 Cournot 모형으로 풀시장을 해석하며 쌍방계약 시장에 대해서는 판매자와 구매자 사이의 직접적인 거래이므로 거래가격이 중요하게 작용하여 Bertrand 모형으로 해석한다.

Cournot 모형에서 기업의 전략변수는 거래량이다. 따라서 F_i의 전략은 이득(πi)을 극대화하는 거래량 q_i를 결정하는 것이다. 하지만 F_i의 극대전략은 다른 참여자의 전략(q_{N-i})에 영향을 받으며 이런 상호연관성 하에 모든 참여자가 자신의 이득을 극대화하려고 할 것이다. 따라서 개별적 극대화 전략의 수렴상태 즉 균형점을 구하기 위해서는 기존의 최적화 기법만으로는 가능하지 않다. 즉 상호연관성을 갖는 n개의 최적화 문제를 동시에 계산해야 하는 것이다[12].

이러한 문제의 해에 대한 이론적 근거는 내쉬(Nash)균형점 개념에 있으며 Cournot 해석 모형에 대한 내쉬균형의 조건은 F_i에서 $\partial\pi_i(q_i, q_{N-i})/\partial q_i = 0$ 이다[13]. 비용함수가 거래량 q의 2차함수로, 수요함수가 1차함수로 표현되고 용량제약 조건이 없으면 이득함수는 오목(concave) 특성을 가지므로 내쉬균형 조건은 n 개의 연립방정식으로 표현된다.

참여 기업이 2개인 경우에 대해 Cournot-내쉬 균형조건을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases} g(q_1+q_2) + q_1 \cdot \partial g/\partial q_1 - f_1(q_1) = 0 \\ g(q_1+q_2) + q_2 \cdot \partial g/\partial q_2 - f_2(q_2) = 0 \end{cases} \tag{1}$$

여기서 f_i는 $f_i = \partial C_i/\partial q_i$로서 1차의 한계비용함수이며 식(1)을 계산함으로써 강제적 풀시장에서의 Cournot 균형점이 구해진다. 이 때의 균형점 거래량과 시장가격을 각각 q_i^p, p^p 라고 표시한다.

3. 쌍방계약과 풀시장의 혼합 형태

3.1 쌍방계약 전력거래

쌍방계약에서는 시장운영자와 무관하게 판매자와 구매자 사이에 거래량과 거래가격이 결정된다. 따라서 판매자는 이득을 극대화시키려는 전략, 구매자는 소비자잉여를 극대화시키려는 전략으로 쌍방계약이 이루어질 것이다. 계통 전체의 수요와 공급이 균형을 이루기 위해서는 전력 풀시장이 병행

해서 운영되는데 쌍방계약에서의 거래는 전력 풀시장에 영향을 주게 된다.

문제해석의 단순성을 위해 수요는 단일 구매자로 가정하고 쌍방계약의 판매자는 F_i라고 가정한다. 따라서 F_i와 구매자 사이의 쌍방계약에 의해 일부의 전력이 공급되면 잔여(residual) 수요에 대해 F_i와 쌍방계약에 참여하지 않은 F_j가 전력 풀시장에서 공급경쟁을 하게 된다.

쌍방계약에서 거래가격과 거래량이 각각 p_b와 q_b로 결정되고 전력 풀시장에서 가격 p에 공급량이 q_i, q_j 로 형성되는 경우, F_i의 이득(π_i)은 다음과 같이 표현된다.

$$\pi_i = R_{bi} + R_{pi} - C_i(q_i + q_b) \tag{2}$$

여기서 $R_{bi}(= p_b \cdot q_b)$는 쌍방계약에 의한 수익(revenue)이고 $R_{pi}(= p \cdot q_i)$는 전력 풀에서의 수익이다. 또한 소비자 잉여(S_c)는 구입에 따른 효용(benefit)과 지출(expenditure)의 차이로 구해지므로 다음과 같이 표현된다.

$$S_c = B(q_i + q_j + q_b) - X_b - X_p \tag{3}$$

여기서 B는 구입량에 따른 소비자 효용을 나타내는 함수이고 $X_b(= p_b \cdot q_b)$는 쌍방계약에 의한 지출, $X_p(= p(q_i + q_j))$는 전력 풀에서의 지출이다.

판매자 F_i의 이득과 소비자잉여를 나타내는 그림1에서 B_b 블럭은 쌍방계약에 의한 거래, B_i는 F_i의 풀시장에서의 거래, B_j는 F_j의 풀시장에서의 거래를 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 쌍방계약에서의 가격(p_b)이 높을수록 F_i의 이득이 증가하고 가격이 낮을수록 소비자 잉여가 증가한다.

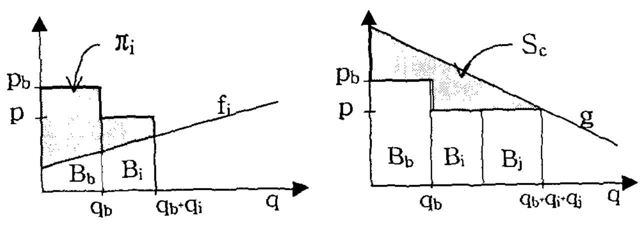

그림 1 이득과 소비자잉여의 표현
Fig. 1 Description of profit and customer's surplus

3.2 쌍방계약이 풀시장에 주는 영향

쌍방계약에서 가격과 거래량이 각각 p_b와 q_b로 결정되면 전력 풀시장에서는 q_b를 제외한 잔여수요에 대한 Cournot-내쉬 균형점이 구해진다. 위의 식(1)에서 쌍방계약 참여자를 F_i라 할 때 균형조건은 다음 식(4)로 표현된다.

$$\begin{cases} g(q_1 + q_2 + q_b) + q_1 \cdot \partial g/\partial q_1 - f_1(q_1 + q_b) = 0 \\ g(q_1 + q_2 + q_b) + q_2 \cdot \partial g/\partial q_2 - f_2(q_2) = 0 \end{cases} \tag{4}$$

수요함수 g와 한계비용 함수 f_1, f_2가 모두 1차이므로 균형전략(q_1^*, q_2^*)은 q_b에 대한 1차함수로 표현되며 이를 각각 $q_1^* = h_1(q_b)$, $q_2^* = h_2(q_b)$로 나타낸다.

쌍방계약 거래량에 따른 풀시장 전략의 민감도를 유도하면 다음 식(5)와 같다.

$$\begin{pmatrix} h_1' \\ h_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial q_1^*/\partial q_b \\ \partial q_2^*/\partial q_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1' - 2g' & -g' \\ -g' & f_2' - 2g' \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} g' - f_1' \\ g' \end{pmatrix} \tag{5}$$

여기서 기호 는 q에 대한 미분을 나타낸 것이며 식을 전개하여 $g' < 0$, $f_i' > 0$을 적용하면 $-1 < h_i' < 0$임을 알 수 있다. 민감도 h_1', h_2'가 음수이기 때문에 쌍방계약 거래량이 증가하면 풀시장에서의 거래량이 감소한다. 따라서 쌍방계약에서의 거래량에는 $q_i \geq 0$을 만족하는 허용범위가 존재하며 q_b의 최대값 q_{bmax}는 $-h_i(0)/h_i'$ 로 계산된다. 여기서 $h_i(0)$는 강제적 풀시장에서의 Cournot 균형점 거래량 q_i^P이다.

이와 같이 풀시장에서의 거래전략은 쌍방계약의 거래량 q_b의 함수로 표현되므로 쌍방계약과 전력풀이 혼합된 형태에서 주요 전략변수는 거래량 q_b와 거래가격 p_b로 나타난다. 따라서 비용함수가 발전량 q의 2차함수이고 수요곡선이 1차함수일 때 기업의 이득함수 식(2)와 소비자잉여 식(3)은 다음과 같이 q_b와 p_b의 2차함수로 표현된다.

$$\pi_i(q_b, p_b) = \alpha_s \cdot q_b^2 + \beta_s \cdot q_b + \gamma_s + p_b \cdot q_b \tag{6}$$
$$S_c(q_b, p_b) = \alpha_c \cdot q_b^2 + \beta_c \cdot q_b + \gamma_c - p_b \cdot q_b \tag{7}$$

여기서 γ_s와 γ_c는 $q_b = 0$ 일 때의 값으로서 강제적 풀시장에서 Cournot 균형점의 이득과 소비자잉여에 해당되며 π_i^P와 S_c^P로 표시한다.

계약의 당사자인 F_i와 구매자는 각각 $\max_{q_b, p_b} \pi_i(q_b, p_b)$, $\max_{q_b, p_b} S_c(q_b, p_b)$의 전략으로 q_b와 p_b의 계약에 임할 것이다.

4. 쌍방계약에서의 전략

4.1 전략변수의 민감도 분석

쌍방계약의 거래가격 p_b가 기업의 이득과 소비자잉여에 미치는 영향은 식(6)과 (7)을 p_b에 대해 미분하면 알 수 있다. 각각 $\partial \pi_i/\partial p_b > 0$, $\partial S_c/\partial p_b < 0$로 계산되므로 기업의 이득은 p_b가 높을수록, 소비자잉여는 p_b가 낮을수록 증가함을 알 수 있으며 이는 그림1에서의 특성과도 일치한다.

하지만 거래량 q_b와 이득 및 잉여의 관계는 식(6),(7)로 나타나므로 이때의 계수 α, β에 따라 달라진다. 우선, 식(6)의 2계 미분값 α_s를 유도하면 식(2)로부터,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \pi_i}{\partial q_b^2} &= \frac{\partial^2}{\partial q_b^2}\{g(q_i + q_j + q_b) \cdot q_i\} - \frac{\partial^2}{\partial q_b^2} C_i(q_i + q_b) \\ &= 2g' \cdot (h_i' + h_j' + 1) \cdot h_i' - f_i' \cdot (h_i' + 1)^2 \ > 0. \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 수요와 한계비용 특성이 $g' < 0$, $f_i' > 0$, $f_j' > 0$ 이고 $-1 < h_i' < 0$, $-1 < h_i' + h_j' < 0$ 이므로 2계 미분값 α_s는 양수가 되어 이득함수 π_i는 볼록(convex)함수가 된다.

또한 소비자잉여 식(7)의 2계 미분값 α_c를 유도하면 식(3)으로부터,

$$\frac{\partial^2 S_c}{\partial q_b^2} = \frac{\partial^2}{\partial q_b^2} B(q_i + q_j + q_b) - \frac{\partial^2}{\partial q_b^2} \{g(q_i + q_j + q_b) \cdot (q_i + q_j)\}$$
$$= g' \cdot (h_i' + h_j' + 1)^2 - 2g' \cdot (h_i' + h_j' + 1) \cdot (h_i' + h_j') < 0. \quad (9)$$

여기에 수요와 한계비용 특성을 고려하면 α_c가 음수가 되어 소비자잉여 함수 S_c는 오목(concave)함수임을 알 수 있다.

한편 계수 β_s는 식(2)에 식(4)의 해를 대입하여 다음과 같이 유도된다.

$$\beta_s = h_i' \cdot p^p + q_i^p \cdot g' \cdot (h_i' + h_j' + 1) - (h_i' + 1) \cdot p^p < 0$$

여기서 p^p, q_i^p 는 각각 강제적 풀시장에서 Cournot 균형점의 시장가격과 거래량이고 h_i', h_j' 조건을 고려하면 β_s는 음수가 된다.

또한 계수 β_c는 식(3)에 식(4)의 해를 대입하여 다음과 같이 유도되어 양수가 된다.

$$\beta_c = 0.5\,(h_i' + h_j' + 1) \cdot (g(0) + p^p)$$
$$- 0.5\,(q_i^p + q_j^p)\,g'(h_i' + h_j' + 1) - (h_i' + h_j') \cdot p^p > 0$$

쌍방계약에서의 전략인 구간 $q_b \in [0, q_{bmax}]$에서 π_i와 S_c의 최대값을 구하기 위해서는 π_i의 극소조건과 S_c의 극대조건을 분석할 필요가 있다. 식(6), (7)에서 극소, 극대는 각각 $q_b^{xs} = -(\beta_s + p_b)/2\alpha_s$, $q_b^{xc} = -(\beta_c - p_b)/2\alpha_c$일 때 나타난다. 하지만 이 값은 계약가격 p_b가 증가함에 따라 변한다. 다음 그림2는 계약가격 p_b가 증가함에 따른 극소, 극대의 변화를 화살표로 표시한 것이다.

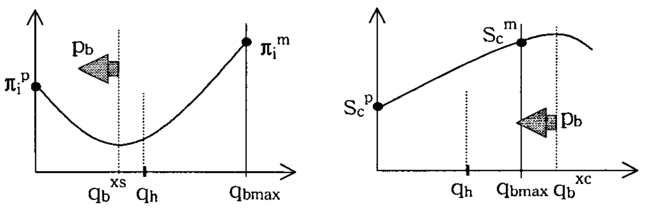

그림 2 계약가격 변동에 따른 이득과 소비자 잉여
Fig. 2 Profit and surplus with changing pb

그림2의 이득함수에서 계수가 $\alpha_s > 0$, $\beta_s < 0$이므로 계약가격 p_b가 증가할수록 극소점의 위치(q_b^{xs})는 왼쪽으로 이동한다. 계약가격이 낮아서 극점이 $q_b^{xs} > q_h (= q_{bmax}/2)$이면 최대이득은 $q_b = 0$인 π_i^p가 되어 쌍방계약을 하지 않는 경우에 해당된다. 계약가격이 높아서 $q_b^{xs} < q_h$이면 최대이득은 $q_b = q_{bmax}$인 $\pi_i^m (> \pi_i^p)$가 된다. 따라서 F_i는 극점이 $q_b^{xs} < q_h$인 범위, 즉 가격이 $p_b > p_s^{cr} (= -\beta_s - \alpha_s q_{bmax})$인 조건에서 q_{bmax}의 거래량으로 계약하려할 것이다.

그림2의 소비자잉여 함수에서 계수가 $\alpha_c < 0$, $\beta_c > 0$이므로 p_b가 증가할수록 극대점의 위치(q_b^{xc})는 왼쪽으로 이동한다. 계약가격이 낮아서 극점이 $q_b^{xc} > q_{bmax}$이면 최대는 $q_b = q_{bmax}$인 $S_c^m (> S_c^p)$가 되고 계약가격이 높아서 극점이 $q_b^{xc} < q_{bmax}$이면 최대는 극대값인 $S_c(q_b^{xc})$가 된다. 따라서 구매자는 $q_b^{xc} > q_{bmax}$의 범위, 즉 가격이 $p_b < p_c^{cr} (= \beta_c + 2\alpha_c q_{bmax})$ 일 때는 q_{bmax}로 계약하려할 것이고, 가격이 $p_b > p_c^{cr}$ 일 때는 q_b^{xc}로 계약하려할 것이다.

4.2 쌍방계약의 가격결정

쌍방계약을 하는 것이 하지 않는 쪽보다 판매계약자에게 유리하기 위해서는 계약가격이 $p_b > p_s^{cr}$으로 높아야하며 이득을 증가시키기 위해서는 계약가격을 더욱 증가시키려 할 것이다. 하지만 구매계약자는 소비자잉여를 증가시키기 위해 계약가격을 낮추려 할 것이다. 따라서 계약은 당사자 사이의 타협에 의해 이루어진다. 만약 $p_s^{cr} < p_c^{cr}$ 일 때 계약가격이 $p_s^{cr} < p_b < p_c^{cr}$ 범위에서 이루어지면 거래량은 q_{bmax}로 자동 결정된다. 하지만 $p_b > p_c^{cr}$으로 높을 때는 판매자는 q_{bmax}의 거래량을 원하고 구매자는 $q_b^{xc} (< q_{bmax})$의 낮은 거래량을 원하기 때문에 거래량에 대한 결정 문제가 다시 발생한다.

이와 같은 계약가격과 거래량의 결정은 본 연구에서 사용하는 Cournot 모형과 비용 및 수요함수의 형태로는 균형점을 구할 수 없는 문제이다. 오로지 계약 당사자의 자체적 기준에 의한 합의를 통해 이루어지는 것이다. 일례로 $p_s^{cr} < p_c^{cr}$ 일 때 거래량이 q_{bmax}로 합의되고, $p_s^{cr} < p_b < p_c^{cr}$ 범위에서 가격흥정이 될 때 계약 당사자들의 이익은 쌍방계약이 없는 경우보다는 항상 크다. 단지 이익을 증가시키려는 전략과 계약 성사를 위한 양보에 의해 타협점이 결정되는 것이다.

쌍방계약의 내용에 따라서 기업의 이득과 소비자의 잉여가 달라지기 때문에 정량적인 분석을 위해서는 구체적인 계약결과가 도출되어야 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 세가지(C1. C2. C3) 계약 형태를 정의한다.

- C1: 판매계약자가 주도권을 가짐 ($q_b = q_{bmax}$, $p_b = p_{bmax}$)

판매계약자는 최대량(q_{bmax})으로 높은 가격의 거래를 원하지만 그림2에서 가격이 크게 상승하면 q_{bmax}에서의 S_c^m는 감소하여 $S_c^m < S_c^p$ 상태에 이른다. 이 경우 구매자가 계약을 포기하게 되므로 가격은 $S_c^m > S_c^p$ 조건을 만족하는 $p_b < p_{bmax} (= \beta_c + \alpha_c q_{bmax})$ 이어야 하며 판매자는 최고가격 p_{bmax}를 선택한다.

- C2: 구매계약자가 주도권을 가짐 ($q_b = q_{bmax}$, $p_b = p_{bmin}$)

구매계약자는 많은 양과 낮은 가격의 거래를 원하지만 $p_b < p_s^{cr}$ 이면 판매자가 계약을 포기하게 되므로 가격은 $p_b > p_{bmin} (= p_s^{cr})$ 조건을 만족해야 하며 구매자는 이때의 최저가격 p_{bmin}을 선택한다.

- C3: 쌍방의 이익 증가 비율이 같은 조건으로 계약함.

계약조건은 다음 식을 만족한다.

$$\pi_i(p_b, q_b)/\pi_i^p = S_c(p_b, q_b)/S_c^p \quad (10)$$

식(10)에 식(6)과 (7)을 대입하여 정리하면 $(\gamma_c\alpha_s-\gamma_s\alpha_c)q_b+(\gamma_c\beta_s-\gamma_s\beta_c)+(\gamma_c-\gamma_s)p_b=0$, 즉 p_b와 q_b 사이의 선형 관계식을 얻는다. 이것을 식(6)에 대입하여 최대값 조건을 구하면 q_b가 구해지고 따라서 p_b도 결정된다. 이때의 가격은 p_{bmin}와 p_{bmax} 사이에 존재한다.

4.3 이득 및 후생의 비교

제안한 쌍방계약과 전력 풀시장의 혼합 모형에 대한 정량적 고찰은 다음과 같은 사례계통을 대상으로 한다. 발전기업의 한계비용 함수 f_1, f_2와 수요함수 g는 모두 1차 함수로 정의한다.

$$f_1(q_1)=10+0.25q_1,\quad f_2(q_2)=5+0.45q_2,\quad g(q_1+q_2)=100-0.5(q_1+q_2)$$

강제적 풀시장에서의 Cournot 균형조건인 식(1)을 계산하면 $q_1^p=53.12$, $q_2^p=47.2$, 시장가격은 $p^p=49.84$, 이득은 $\pi_1^p=1763.6$, $\pi_2^p=1615.2$, 소비자 잉여는 $S_c=2516.0$이다.

쌍방계약이 F_1과 구매자 사이에 이루어질 때 계약거래량과 풀에서의 거래량 관계인 식(4)는 $q_1=53.12-0.536\cdot q_b$, $q_2=47.2-0.16\cdot q_b$이고, F_i의 이득과 소비자잉여인 식(6), (7)은 각각 $\pi_1=0.0546q_b^2-45.6q_b+1763.6+p_bq_b$, $S_{c1}=-0.129q_b^2+65.1q_b+2516.0-p_bq_b$ 이 된다.

거래량의 허용 범위는 $q_{bmax}=99.1$이고 거래가격의 범위는 $p_{bmin}=40.18$, $p_{bmax}=52.31$이다. 다음 표1은 F_1과 구매자 사이에 세 가지 형태(C1, C2, C3)의 계약이 이루어질 때 쌍방계약 및 풀시장에서의 거래결과와 기업이득 및 소비자잉여 그리고 사회적 후생을 비교한 것이다.

표1에서 q_b는 계약의 형태에 관계없이 q_{bmax}이고 p_b가 풀시장에서의 가격(34.78)보다 높기 때문에 F_1이 풀시장에서는 거래하지 않음을 알 수 있다. 따라서 F_2의 판매량(31.34)과 전력 풀에서의 가격(34.78)은 계약형태에 관계없이 일정하다. 하지만 p_b는 계약의 형태에 따라 다르게 나타난다. 계약 C1에서는 최대가격이 선택되어 강제적 풀에 비해 F_1의 이득(π1)이 크게 증가하고 소비자잉여(Sc)는 변동이 없다. 반대로 계약 C2에서는 최저가격이 선택되어 π1은 변동이 없으나 Sc가 크게 증가한다.

계약 C3에서는 상호 타협에 의해 π1과 Sc가 같은 비율(28.1%)로 증가하는 가격이 선택된다. 강제적 풀 방식에 비해 기업 총이득은 감소하고 Sc가 크게 증가하여 사회적 후생(W)이 약 5.1% 증가한다. 사회적 후생의 증가는 계약 형태와 무관하게 동일한데 이는 계약형태가 기업과 소비자 사이에 잉여의 분배에만 영향을 주는 사실을 알 수 있다.

또한 쌍방계약이 F_2와 구매자 사이에 이루어질 때는 $q_1=53.12-0.16\cdot q_b$, $q_2=47.2-0.6\cdot q_b$ 이고, F_2의 이득과 소비자잉여는 $\pi_2=0.036q_b^2-46.1q_b+1615.2+p_bq_b$, $S_{c2}=-0.106q_b^2+61.9q_b+2516.-p_bq_b$이 된다. 최대 허용거래량은 $q_{bmax}=78.7$이고 거래가격의 범위는 $p_{bmin}=43.23$, $p_{bmax}=53.57$이다. 이 때의 계산 결과는 표2와 같다.

표2에서도 q_b는 계약의 형태에 관계없이 q_{bmax}이고 계약에 참여하지 않은 기업의 판매량과 전력 풀에서의 가격은 일정하며 계약에 따른 가격의 결정 특성은 표1에서와 동일하다. 계약 C3에서 π2와 Sc의 증가비율은 19.7%로 동일하며 쌍방계약이 이루어짐으로써 기업 총이득은 감소하고 Sc가 증가하여 사회적 후생이 1.3% 증가한다. 여기서도 계약형태에 따라 사회적 후생이 달라지지 않음을 알 수 있다.

5. 가격경쟁형 쌍방계약시장

5.1 가격경쟁형 쌍방계약시장

쌍방계약시장과 전력 풀시장이 혼합되어 있는 사례계통에서 쌍방계약시장에 적극적으로 참여하는 것이 기업의 이득을 증가시킨다는 것을 표1과 2를 통해 확인하였다. 반면 쌍방계약을 하지 않은 기업의 이득은 강제적 풀시장일 때 보다 크게 감소한다. 따라서 공급기업은 경쟁적으로 구매자와 쌍방계약을 맺으려 할 것이다.

이러한 쌍방계약 경쟁 현상을 분석하기 위해서 두개의 공급기업이 쌍방계약 시장에서 가격경쟁을 하는 모형을 세우고 이를 전력 풀시장과 연계하여 전체적인 균형점을 도출한다. 전력 풀시장은 앞에서와 같이 Cournot 모형으로, 쌍방계약시장은 Bertrand 가격경쟁 모형으로 정의한다.

표 1 기업1과 구매자의 쌍방계약이 있을 때 잉여와 후생

Table 1 Results of equilibrium with bilateral contract between firm1 and consumer

		q_1	q_2	q_b	$p_{(pool)}$	p_b	π_1	π_2	$\Sigma\pi$	S_c	W
강제적 풀		53.12	47.2	-	49.84	-	1763.6	1615.2	3378.8	2516.0	5894.8
쌍방계약 +전력풀	C1	0	31.34	99.1	34.78	52.31	2965.8	712.2	3678.1	2516.0	6194.1
	C2	0	31.34	99.1	34.78	40.18	1763.6	712.2	2475.8	3718.3	6194.1
	C3	0	31.34	99.1	34.78	45.18	2259.0	712.2	2971.3	3222.8	6194.1

표 2 기업2와 구매자의 쌍방계약이 있을 때 잉여와 후생

Table 2 Results of equilibrium with bilateral contract between firm2 and consumer

		q_1	q_2	q_b	$p_{(pool)}$	p_b	π_1	π_2	$\Sigma\pi$	S_c	W
강제적 풀		53.12	47.2	-	49.84	-	1763.6	1615.2	3378.8	2516.0	5894.8
쌍방계약 +전력풀	C1	40.53	0	78.7	40.4	53.57	1026.8	2428.9	3455.5	2516.0	5971.5
	C2	40.53	0	78.7	40.4	43.23	1026.8	1615.2	2641.9	3329.5	5971.5
	C3	40.53	0	78.7	40.4	47.27	1026.8	1933.1	2959.9	3011.6	5971.5

두 기업이 제시한 쌍방거래 가격 중에서 낮은 가격이 구매자로부터 선택되므로 가격 p_b는 가격인하 경쟁에서 낮은 가격으로 결정이 된다. 앞의 4절에서 고찰한 쌍방계약은 일종의 독점적 계약이다. F_i는 p_{bmin} 이상의 가격으로만 계약을 하기 때문에 강제적 풀시장일 때의 이득인 π_i^p를 보장받게 된다. 하지만 쌍방계약에 실패하는 경우에 이득은 크게 감소하므로 경쟁형 쌍방계약시장에서는 더 이상 이득 π_i^p를 보장받을 수 없다. 따라서 판매기업은 p_{bmin} 이하의 가격으로 경쟁에 임하게 된다.

5.2 경쟁의 균형점 계산

거래가격(p_b)이 충분히 높으면 거래량은 q_{bmax}으로 결정되어 $p_b > f_i(q_{bmax})$, 즉 계약가격이 한계비용 보다 높지만, 가격이 낮아지면 $p_b < f_i(q_{bmax})$이 되어 거래량은 q_{bmax}이 아닌 $q_b = f_i^{-1}(p_b)$, 즉 한계비용이 계약가격과 같아지는 값으로 결정된다.

또한 독점적 쌍방계약 시장에서는 거래량이 q_{bmax}가 되어 1,2에서와 같이 판매계약 기업(F_i)의 풀시장에서의 거래는 이뤄지지 않지만 낮은 가격에서는 거래량이 $q_b = f_i^{-1}(p_b) < q_{bmax}$ 이 되어 F_i는 풀시장에서도 거래에 참여하게 된다.

낮아질수록 쌍방계약 거래량이 감소하여 F_i의 이득은 감소하고 풀시장에서의 거래량이 증가하기 때문에 비계약기업의 이득은 점차 증가하게 된다.

따라서 가격인하 과정에서 쌍방계약에 참여할 때보다 비계약일 때의 이득이 오히려 클 수가 있으므로 쌍방계약에서의 경쟁은 비계약시보다 이득이 커지는 범위에서 이루어질 것이다. F_i의 경쟁가격(p_i)이 상대 기업의 가격(p_j)보다 낮을 때 F_i의 이득을 π_i^w 라 하고, 높을 때의 이득을 π_i^l 라 하면, F_i는 $\pi_i^w > \pi_i^l$일 때 가격인하 경쟁을 하고 $\pi_i^w \le \pi_i^l$일 때는 쌍방계약을 하지 않을 것이다. 여기서 π_i^w는 가격경쟁에서 이기는 경우이므로 쌍방계약이 체결되고 이 때의 이득은 식(6)과 같이 나타난다. 식(6)에 거래량 조건 $q_b = f_i^{-1}(p_b)$ 식을 대입함으로써 π_i^w는 p_i의 2차함수로 표현된다.

또한 π_i^l는 가격경쟁에서 지는 경우이므로 쌍방거래는 F_j와 구매자 사이에 $p_b = p_j$와 $q_b = f_j^{-1}(p_j)$로 계약이 이루어지고 F_i의 거래는 전력 풀시장에서만 이루어진다. 따라서 이득은 $\pi_i^l = p \cdot q_i - C_i(q_i)$로 계산된다. 여기서 q_i는 풀시장에서의 거래량으로서 식(4)의 해인 $h_i(q_b)$로 표현되고, p는 풀시장의 가격으로서 수요함수인 $g(q_i + q_j + q_b)$로 표현된다. 이를 정리하면 π_i^l은 다음과 같이 상대가격 p_j 만의 함수로 표현된다.

$$\pi_i^l(p_j) = g(h_i(f_j^{-1}(p_j)) + h_j(f_j^{-1}(p_j)) + f_j^{-1}(p_j)) \cdot h_i(f_j^{-1}(q_j)) - C_i(h_i(f_j^{-1}(p_j)))$$

여기에 1차함수인 g, h, f와 2차함수인 C를 적용하면 $\pi_i^l(p_j)$는 p_j의 2차 함수임을 알 수 있다.

F_i가 가격경쟁을 하는 조건, $\pi_i^w(p_i) \ge \pi_i^l(p_j)$에 $p_i = p_j - \epsilon$ 관계를 대입하여 부등식을 계산하면 $p_j > p_{cri}$의 조건이 유도된다. 따라서 F_i는 상대가격이 $p_j > p_{cri}$ 일 때는 가격인하경쟁을 하고 $p_j \le p_{cri}$ 일 때는 쌍방계약을 포기할 것이다. 같은 방식으로 F_j의 전략에 대해 유도하면 p_{crj}이 계산되고 F_j는 $p_i > p_{crj}$ 범위에서만 가격인하경쟁을 한다.

만약 $p_{cri} > p_{crj}$ 이면 F_i는 p_{cri} 이상에서만 가격경쟁을 하므로 F_j는 $p_{cri} - \epsilon$의 가격으로 쌍방계약을 하게 된다. 반대로 $p_{cri} < p_{crj}$ 이면 F_j는 p_{crj} 이상에서만 가격경쟁을 하므로 F_i는 $p_{crj} - \epsilon$의 가격으로 쌍방계약을 하게 된다. 따라서 가격경쟁의 균형점은 $max(p_{cri}, p_{crj}) - \epsilon$의 가격이 된다.

5.3 균형점에서의 결과 해석

이상과 같은 가격경쟁형 쌍방계약시장 모형을 4.3절에서의 사례연구 대상 시장에 적용하면 기업의 이득함수는 다음과 같이 유도된다.

$$\pi_1^w(p_1) = 4.9p_1^2 - 239.8p_1 + 3674.5,$$
$$\pi_1^l(p_2) = 0.08p_2^2 - 24.4p_2 + 1883.6$$
$$\pi_2^w(p_2) = 2.4p_2^2 - 115.3p_2 + 2131.5,$$
$$\pi_2^l(p_1) = 0.27p_1^2 - 82.57p_1 + 2545.8$$

여기에 가격경쟁 참여 조건을 적용하면 $p_{cr1} = 33.92$, $p_{cr2} = 23.58$이 계산된다. 따라서 F_1은 33.92 이상의 가격으로 쌍방계약에 임하고 F_2는 그 보다 약간 낮은 33.9의 가격전략을 사용함으로써 쌍방계약은 F_2와 구매자 사이에 $p_b = 33.9$, $q_b = 64.22 (= f_2^{-1}(p_b))$의 조건에 이루어진다. 이러한 상태가 내쉬 균형점임을 검증하기 위해 한계(marginal) 이득 분포를 살펴보면 다음 그림3과 같다.

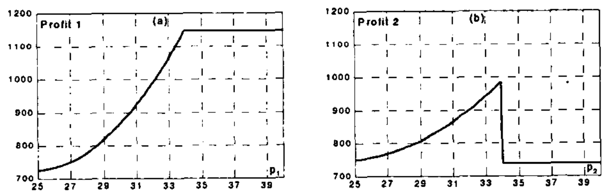

그림 3 균형점에서의 한계이득분포

Fig. 3 Marginal payoffs at Nash equilibrium

그림(a)는 $p_2 = 33.9$일 때 F_1의 가격 변화에 따른 이득을 나타낸 것으로서 가격경쟁에서 이기는 경우에 오히려 이득이 감소하고 쌍방계약을 하지 않는 경우에 높은 이득이 나타남을 보인다. 그림(b)는 $p_1 = 33.92$일 때 F_2의 가격 변화에 따른 이득으로서 33.9의 가격으로 언더컷(undercut)하여 쌍방계약을 체결하는 경우가 이득이 극대가 됨을 나타낸다. 두 기업은 이러한 상태를 스스로 변화시킬 유인(incentive)이 없으므로 내쉬균형에 해당된다[13].

이러한 균형점에서 F_1, F_2의 이득과 소비자잉여 등을 계산하면 다음 표 3과 같다. 강제적 풀시장의 결과 및 제4절 독점적 쌍방계약에서 C3 형태로 계약하는 경우의 결과와 비교한다. F_1이 독점적으로 체결하는 경우와 F_2가 독점적으로 체결하는 경우를 구분하여 비교한다.

경쟁형 쌍방계약시장에서 F_2는 쌍방계약으로 64.22MW/h, 풀시장에서 8.67MW/h를 판매하고 F_1은 풀시장에서만

표 3 경쟁형 쌍방계약에서의 균형점 결과

Table 3 Results of equilibrium with competitive bilateral contract

		q_1	q_2	q_b	$p_{(pool)}$	p_b	π_1	π_2	$\Sigma\pi$	S_c	W
강제적 풀		53.12	47.2	-	49.84	-	1763.6	1615.2	3378.8	2516.0	5894.8
독점적 쌍방계약(C3)	F_1	0	31.34	99.1	34.78	45.18	2259.0	712.2	2971.3	3222.8	6194.1
	F_2	40.53	0	78.7	40.4	47.27	1026.8	1933.1	2959.9	3011.6	5971.5
경쟁형 쌍방계약(F_2)		42.84	8.67	64.2	42.1	33.9	1147.3	982.5	2129.8	3877.3	6007.1

42.84MW/h를 풀시장에서의 가격 42.1에 판매한다. 이 때의 기업이득은 독점적 쌍방계약시장에서 계약을 할 때 보다는 낮고 하지 않을 때 보다는 높게 나타난다. 사회적 후생(W) 또한 F_1의 독점적 쌍방계약 체결 결과와 F_2의 계약 결과의 사이값으로 계산된다. 하지만 소비자 잉여는 다른 모든 경우보다 높게 나타나는 특징이 있다.

이상과 같이 쌍방계약시장이 전력시장에 도입됨으로써 강제적 풀시장에 비해 사회적 후생과 소비자 잉여가 증가하여 시장의 효율성[3]이 향상됨을 알 수 있다. 또한 쌍방계약시장에서 가격경쟁을 유도함으로써 불완전 경쟁에서 좀 더 완전경쟁 형태에 가까워진다는 사실이 정량적으로 확인된다.

5. 결 론

전력시장에 경쟁원리를 도입하는데 있어 거래의 방식을 설계하는 것은 가장 중요한 사항 중의 하나이다. 본 연구는 전력거래의 대표적 두 가지 방식인 강제적 풀시장과 쌍방계약시장에 대해 소비자 잉여와 사회적 후생 관점에서 정량적으로 비교하였다.

쌍방계약시장은 전력 풀시장이 병행되기 때문에 비교는 강제적 풀시장과 혼합형 시장에 대해 이루어졌으며 계약시장은 독점형 계약과 경쟁형 계약으로 구분하였다. 독점형 계약시장에서는 거래량과 거래가격이 독립적으로 결정되므로 세 가지의 계약 형태를 가정하여 분석하였고, 경쟁형 계약시장에서는 경쟁에 의해 가격이 결정되고 거래량은 한계비용과 관련되어 결정되므로 가격경쟁의 균형점을 분석하였다.

쌍방계약시장에서의 거래와 전력 풀에서의 거래에 대한 상관관계를 도출함으로써 전력 풀시장과 계약시장이 동시에 고려되는 복합 가격경쟁 모형에서의 내쉬균형 가격전략을 유도하였다. 균형점에서의 이득, 잉여 및 후생을 비교한 결과 쌍방계약시장의 도입이 사회적 후생을 증대시킨다는 특성과 쌍방계약이 가격경쟁에 의해 이루어지는 것이 소비자 잉여를 증가시키는 특성을 확인하였다.

이러한 결과는 전력시장에 쌍방계약시장과 풀시장이 혼재하는 복잡한 상황을 간단한 해석모형인 Bertrand와 Cournot의 혼합모형으로 해석을 한 것이고 사례연구 계통만을 대상으로 한 것이기 때문에 일반적인 특성이라 하기에는 한계가 있다.

거래방식의 비교분석은 여러 가지 측면에서 폭넓게 이루어져야 하며 본 연구에서 제안한 분석 모형과 유도 결과는 시장지배력 등 정량적인 비교분석을 하는데 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] 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.

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

[3] M. Shahidehpour, M. Alomoush, Restructured Electrical Power Systems, Marcel Dekker, Inc., 2001.

[4] J. Bower and D. Bunn, "A Model-Based Comparison of Pool and Bilateral Market Mechanisms for Electricity Trading," London Business School, Energy Market Group, May 1999.

[5] 윤원철, 주요국의 전력산업 구조개편 비교연구, 연구보고서, 에너지경제연구원, 2001.

[6] F.D. Galiana, I. Kockar, P.C. Franco, "Combined Pool/Bilateral Dispatch-Performance of Trading Strategies," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.17, No.1, pp.92-99, February 2002.

[7] H. Song, C.C. Liu, J. Lawarree, "Nash Equilibrium Bidding Strategies in a Bilateral Electricity Market," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.17, No.1, pp.73-79, February 2002.

[8] W.W. Hogan, "An Efficient Bilateral Market Needs a Pool," CPUC Hearing, Available at: http://ksghome.harvard.edu/~.whogan.cbg.ksg, August 1994.

[9] S.M. Harvey, W.W. Hogan, "California Electricity Prices and Forward Market Hedging," Available at: http://ksghome. harvard.edu/~.whogan.cbg.ksg, October, 2000.

[10] B. Allaz, J.L. Vila, "Cournot Competition, Forward Markets and Efficiency," Journal of Economic Theory, Vol.59, pp.1-16, 1993.

[11] R. Green, "The Electricity Contract Market in England and Wales," The Journal of Industrial Economics, Vol.47. No.1, pp.107-124, March 1999.

[12] 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.

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

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