

## 배출권 거래를 고려한 쿠르노 모형 기반의 전력시장 모델링 기법에 관한 연구

### Modeling of Electricity Market based on Cournot Theory in consideration of Emissions Trading

이광호\* · 김 욱\*\*†

Kwang-Ho Lee, and Wook Kim†

\*단국대학교 전자전기공학부, \*\*부산대학교 전기공학과

\*School of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University

† \*\*Department of Electrical Engineering, Pusan National University

#### 요 약

이 논문은 불완전 경쟁시장의 형태를 가지고 있는 전력시장과 탄소배출권시장에서 수익 극대화를 추구하는 발전회사의 전략적 입찰행위를 분석하는데 사용할 수 있는 쿠르노(Cournot) 기반의 전력시장 모델링 기법을 제안한다. 제안된 전력시장의 모델은 크게 두 부분으로 구성되어있다. 첫 번째 모델은 쿠르노 모델을 이용한 발전회사의 전략적 행위에 대한 모델이며, 두 번째 모델은 환경적 후생을 고려하여 전체 사회적 후생을 극대화하기 위한 시장운영자에 대한 모델이다. 두 모델의 결합을 통하여 배출권 거래를 고려한 전력시장의 모델이 구성되었으며, 이에 대한 내쉬균형점(Nash Equilibrium)을 계산하기 위하여 2단계 최적화 기법(Two-level optimization)을 사용하였다. 제안된 모델을 3개의 발전회사가 존재하는 샘플 전력시장에 적용하여 그 효용성을 검토하였다.

**키워드** : 전력시장, 탄소 배출권 시장, 쿠르노 모형, 내쉬균형, 불완전경쟁시장, 게임이론

#### Abstract

This paper proposes a Cournot model that can be used to analyze the strategic behaviors of generation companies which try to maximize their profits in an imperfectly competitive electricity and carbon markets. The proposed model consists of two parts. First, the strategic behaviors of generation companies are modeled based on the Cournot theory. Second, the market operation is modeled based on the assumption that the market operator tries to maximize the total social welfare in consideration of environmental welfare. To find the Nash equilibrium of the proposed model, the two-level optimization technique is used. The proposed method has been applied to an illustrative example of oligopolistic markets. We found that the proposed method has strong potential to analyze the influence of the strategic biddings of the generation companies and the impact of renewable generator on markets where the competitiveness of the markets is not fully developed.

**Key Words** : Electricity market, Carbon market, Cournot model, Nash equilibrium, Strategic behaviour

## 1. 서 론

접수일자: 2014년 6월 12일

심사(수정)일자: 2014년 8월 4일

게재확정일자 : 2014년 8월 5일

† Corresponding author

본 연구는 BK21플러스, IT기반 융합산업 창의인력양성 사업단에 의한 지원 및 2011학년도 부산대학교 교내 학술연구비(신임교수연구정착금)에 의한 연구임.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기후변화협약에서 배출권 거래제(Cap-and-trade emissions trading scheme)를 교토 메카니즘의 하나로 채택하면서 이러한 배출권 거래제가 각 국가의 경제에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구가 다양하게 진행되어 왔다. EU의 경우는 가장 먼저 2005년에 탄소배출권 거래제를 도입하였으며, 미국은 유럽보다 다소 늦은 2009년에 RGGI 시장이 개설되었다. 최근에는 호주나 한국과 같은 국가에서 새롭게 탄소배출권 시장의 개설을 준비중이다.

EU나 미국과 같이 상당히 많은 수의 시장참여자가 존재하여 비교적 완전경쟁 시장에 가까운 상황과는 달리 한국과 같은 신흥 경제국은 탄소배출권 시장과 전력시장의 규모가 비교적 작고, 시장참여자의 수가 제한적이기 때문에 완전경쟁시장보다는 불완전경쟁 시장의 형태가 될 가능성이 매우 높다. EU-ETS의 경우도 시장을 개설하기 전 많은 연구를

통하여 EU-ETS는 완전 경쟁시장에 가까운 체제가 될 것으로 예상하였으나, 실제로는 많은 시장참여자들(특히 발전회사)이 시장 설계의 허점을 찾아내어 막대한 우발이익(Windfall Profit)을 거둬들여 시장지배력에 대한 논란이 진행된 바 있다[1].

무엇보다도 발전부문의 탄소배출량이 차지하는 비중이 높아 배출권 시장에서 상대적으로 발전회사들이 차지하는 비중이 절대적인데, 예를 들어 EU-ETS나 미국의 RGGI 배출권 시장에서 발전회사가 차지하는 비중은 각각 60% 및 100%로 절대적인 비중을 차지하고 있다[3]. 특히 경제의 규모가 크지 않은 대부분의 신흥 경제국의 배출권 시장은 완전 경쟁시장이기 보다는 불완전 경쟁시장, 즉 과점시장(Oligopolistic market)이 될 가능성이 높다. 만약 전력시장이나 배출권 시장이 불완전 경쟁시장이라는 가정이 성립된다면, 이러한 시장에서는 발전회사의 입찰 전략에 따라 전력시장 및 탄소시장의 시장가격이 많은 영향을 받게 된다. 특히, 배출권 거래시장이 도입되는 초기에 온실가스 감축에 대한 재무적 부담을 경감시키기 위해서 무상 할당되는 방식의 설계가 잘못될 경우 탄소시장에서의 시장지배력이 심화될 수 있다는 연구가 발표된 바 있다[2]. 따라서, 본 논문에서는 발전회사의 입찰전략에 따라 탄소 배출권 시장 및 전력시장의 가격이 상당한 영향을 받을 수 있는 불완전 경쟁시장을 가정하고, 발전회사의 입찰전략에 따라 배출권 시장과 전력시장이 어떻게 영향을 받는지를 분석하기 위하여 게임이론의 가장 대표적인 모델링 기법 중의 하나인 쿠르노 이론을 기반으로 하는 모델링을 수행한 결과를 제시한다.

과점시장에서는 시장 참여자가 각자가 가지고 있는 시장 지배력과 시장에서의 우월적 지위를 암묵적으로 이용하여 수익을 극대화하고자 하는 것이 자연스러운 현상이다. 이 논문의 주된 목적은 탄소 배출권 시장과 전력시장 양쪽에 모두 참여하여야 하는 발전회사들의 전략적 입찰을 모델링하고 그 결과를 이용하여 이러한 전략적 입찰이 양쪽 시장에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고자 한다.

탄소 배출권 시장을 분석하기 위한 수학적 모델은 지금까지 다양한 모델들이 연구된 바가 있다. 대표적으로 탄소 비용이 전력시장에 미치는 재무적 영향 및 리스크를 분석하기 위하여 선형계획법(Linear programming)[3], 공급함수 모델(Supply function model)[4], VAR(Volume at Risk) 모델[5], 거시경제 모델[6], 실물 옵션 모델(Real option model)[7] 등이 사용된 연구가 발표된 바 있다.

탄소 배출권 시장이 없는 상태에서 과점 형태의 전력시장에 대하여 쿠르노 기반의 모델링 기법을 적용하여 발전회사의 전략적 입찰을 분석한 연구는 다수의 사례가 존재한다[8]. 본 논문은 이러한 기존의 전력시장에 적용되어 온 쿠르노 모형을 발전회사가 탄소 배출권 시장과 전력시장에 모두 참여하여야 하는 경우에 확대 적용하는 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안된 모델은 2가지의 목적함수를 가지는 모델로 구성되어 있는데, 첫 번째 목적함수는 발전회사가 탄소 배출권 시장과 전력시장에서의 총 수익을 극대화하기 위하여 발전회사의 입찰전략을 의미하며, 두 번째 목적함수는 시장 운영자가 탄소 배출권 시장과 전력시장에서의 전체 사회적 후생을 극대화하기 위한 목적함수이다.

우선 다음 절에서는 제안된 쿠르노 기반의 모델링 기법에 대해서 설명하며, 3절에서는 제안된 2단계 쿠르노 모형에 대한 내쉬균형점(Nash equilibrium)을 계산한 결과가 제시된다. 4절에서는 제안된 모델을 이용하여 발전회사의 전

략적 입찰이 우리나라의 전력시장과 탄소 배출권 시장에 미치는 영향을 분석하였다. 5절에서는 제안된 모델을 활용하는 하나의 사례로 신재생에너지가 전력시장 및 배출권 시장에 미치는 영향을 분석하는 방안에 대하여 제시한다. 마지막 절에서는 결론을 서술한다.

## 2. 탄소 배출권 거래시장을 고려한 전력시장 모델링 기법

### 2.1 발전회사의 전략적 입찰에 대한 모델링

총량제약 탄소 배출권 시장은 우선 각 발전회사별로 연간 배출량의 상한치 또는 연간 온실가스 감축량을 할당하는 것으로 거래가 시작된다. 이러한 할당량이 부여되면 각 발전회사  $i$ 는 전력시장과 탄소배출권 시장에서의 수익을 극대화하도록 발전량을 결정하려고 할 것이다. 이 때, 각 발전회사의 수익은 다음 식으로 정의된다.

$$\Pi_i(q_i) = \Pi_i^E(q_i) + \Pi_i^C(q_i) \quad (1)$$

여기서,  $q_i$ 는 각 발전회사  $i$ 의 발전량을 의미한다. 또한  $\Pi_i^E$  및  $\Pi_i^C$ 는 발전회사  $i$ 의 전력시장 및 탄소시장으로부터의 이익을 의미하며, 각각은 다음과 같이 정의된다.

$$\Pi_i^E = P^E q_i - C_i(q_i) \quad (2)$$

$$\Pi_i^C = P^C x_i \quad (3)$$

여기서  $P^E$  및  $P^C$ 는 전력시장과 탄소시장에서의 시장가격,  $C_i(q_i)$ 는 발전량이  $q_i$ 일 때의 비용,  $x_i$ 는 각 발전회사의 연간 온실가스 할당량 대비 감축량(잉여 배출권)을 의미한다.

일반적으로 전력 수요는 전기요금에 음의 가격탄력성을 가지므로 식(2)의 전기요금  $P^E$ 와 전력수요  $d$ 사이에는 다음과 같이 선형의 관계가 있으며, 상수  $m^E$ 와  $b^E$ 는 주어진다 고 가정한다.

$$P^E = -m^E d + b^E \quad (4)$$

또한, 식(2)에 포함되어 있는 발전회사의 연간 발전비용은 다음과 같이 연간 발전량  $q_i$ 의 2차식으로 표현할 수 있으며, 상수  $a_i$  및  $b_i$ 는 주어진다고 가정한다.

$$C_i(q_i) = \frac{1}{2} a_i q_i^2 + b_i q_i \quad (5)$$

여기서,  $a_i$  및  $b_i$ 는  $i$ 발전기의 비용함수의 비례상수를 의미한다. 또한, 식(3)의 탄소 배출권 시장의 가격인  $P^C$ 에 대해서는 총 온실가스 감축량( $x_t = \sum_i x_i$ )에 대하여 반비례 관계가 있으므로 다음과 같이 선형식으로 표현할 수 있으며, 마찬가지로 상수  $m^C$  및  $b^C$ 는 주어진다고 가정한다.

$$P^C = -m^C x_t + b^C \quad (6)$$

만약 발전회사  $i$ 에 할당된 연간 온실가스 배출량을 연간 발전량으로 환산(연간발전량 = 온실가스 배출량 / 온실가스 배출계수)한 값을  $q_i^c$ 로 정의하면, 발전회사  $i$ 의 온실가스 감축량  $x_i$ 는 아래 식과 같이 정의될 수 있다.

$$x_i = q_i^c - q_i \quad (7)$$

만약 어떤 발전회사의 탄소 감축비용이 배출권 구입가격보다 높다면 발전회사는 직접 감축을 하는 것 보다는 배출권 시장에서 배출권을 구입하여 부족한 배출권을 확보하는 대신에 발전량을 늘려서 전력시장에서의 수익을 증가시키려고 할 것이다. 그러나, 발전량의 증가로 인해 전력시장 가격은 감소하는 반면 배출권 거래가격은 증가하게 되므로 발전량을 무한정 증가시킬 수는 없을 것이다. 반대로, 발전회사의 감축비용이 배출권 가격보다 낮다면 발전회사는 발전량을 감소시켜서 추가적으로 발생한 배출권을 판매하여 배출권 거래시장에서의 수익을 증가시키는 입찰 전략을 추구하려고 할 것이다. 이 경우에도 마찬가지로 배출권 가격은 하락하는 반면 전력 가격이 상승하므로 상대적인 기회 손실이 발생할 가능성이 있으므로 발전량을 무한정 감소시키는 것은 불가능하다.

식(6)의  $b^C$ 가 바로 이러한 발전회사의 입찰전략을 결정하는 파라미터가 된다. 즉, inverse demand curve의 절편인  $b^C$ 가 상대적으로 높은 값을 가진다는 것은 발전회사의 입장에서 다른 산업 분야의 탄소감축비용이 높음을 의미하며 이는 전반적인 탄소 배출권 가격이 높음을 나타낸다. 즉,  $b^C$ 가 높을 경우 발전 부문은 높은 가격의 배출권을 구입하는 것보다는 자체적으로 발전량을 감소시키거나 신재생에너지에 대한 투자를 늘림으로써 탄소 배출량을 감축시키는 노력이 증가하게 될 의미이다. 따라서, 이러한  $b^C$ 의 값은 발전 부문의 자체적인 탄소 감축목표 달성에 대한 의지(Willingness)로 표현될 수 있다.

### 2.2 사회적 후생을 극대화하기 위한 시장운영자(정부)에 대한 수학적 모델링

탄소 배출권 시장과 전력시장의 총 수익을 극대화하려는 발전회사의 입장과는 달리 전력시장과 배출권 시장을 운영하는 정부, 즉 시장운영자(market operator)는 전력시장과 배출권 시장에서 발생하는 사회적 후생(social welfare)를 극대화하는 방향으로 시장을 운영하려고 한다. 전력시장에서의 사회적 후생  $SW_E$ 는 소비자 후생  $B(d)$ 에서 발전비용  $C(q_i)$ 의 합을 차감한 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$SW_E = B(d) - \sum_i C_i(q_i) \quad (8)$$

단, 위 식에서 소비자 후생  $B(d)$ 는 식(4)를  $d$ 에 대하여 적분한 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$B(d) = -\frac{1}{2}m^E d^2 + b^E d \quad (9)$$

한편, 탄소배출권 시장에서의 사회적 후생은 아래 <그림 1>에 나타난 바와 같이 식(6)을  $x_i$ 에 대하여 적분한 값으로 표현할 수 있다.

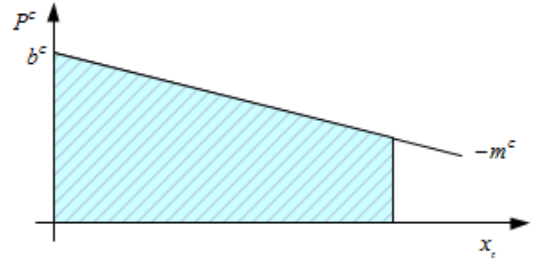


그림 1. 발전부문에 대한 탄소배출권 시장의 사회적 후생  
Fig. 1. Social welfare in the carbon market

$$SW_C = -\frac{1}{2}m^C x_i^2 + b^C x_i \quad (10)$$

따라서, 시장 운영자는 다음 식(11)에서와 같이 식(8)로 주어진 전력시장의 사회적 후생과 식(10)과 같은 탄소 배출권 시장의 사회적 후생의 합을 극대화하는 발전량을 결정하려고 할 것이다.

$$SW = SW_E + SW_C \quad (11)$$

### 2.3 내쉬균형점(Nash Equilibrium)의 계산

앞 절의 내용을 요약하면 주어진 문제는 다음과 같은 목적함수가 2개인 최적화 문제로 정리될 수 있다. 즉,

$$Max \Pi_i(q_i) = \Pi_i^E(q_i) + \Pi_i^C(q_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (12)$$

$$Max SW = SW_E + SW_C \quad (13)$$

$$s.t. \quad d = \sum_i q_i \quad (14)$$

위와 같이 목적함수가 2개인 최적화 문제의 내쉬 균형점(Nash equilibrium)을 구하기 위해서 Borenstein et al[9]이 사용한 다음과 같은 2단계 최적화(two-level optimization) 기법을 다음과 같이 적용하였다.

$$\partial \Pi_i(q_i) / \partial q_i = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (15)$$

$$\partial L / \partial d = 0 \quad (16)$$

$$\partial L / \partial \lambda = 0 \quad (17)$$

여기서,  $L$ 은 식(13) 및 식(14)에 대한 라그랑지 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$L = SW + \lambda (\sum_i q_i - d) \quad (18)$$

식(15)~식(17)의 해는 다음과 같은 방정식의 해가 된다.

$$Y = A^{-1}b \quad (19)$$

단,  $Y$ ,  $A$ ,  $b$ 는 각각  $(n+2) \times 1$ ,  $(n+2) \times (n+2)$  및  $(n+2) \times 1$ 의 행렬로 다음과 같이 정의된다.

$$Y = [d \lambda q_1 q_2 \dots q_n]^T \quad (20)$$

$$A = \begin{bmatrix} m^E & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ m^E & 0 & m_1 + 2m^C + m^E & m^C & \dots & m^C \\ m^E & 0 & m^C & m_2 + 2m^C + m^E & \dots & m^C \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m^E & 0 & m^C & m^C & \dots & m_n + 2m^C + m^E \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$b = \begin{bmatrix} b^E \\ 0 \\ b^E - b_1 - b^C + m^C q_1^r + m^C q_2^r + \dots + m^C q_n^r \\ b^E - b_2 - b^C + m^C q_1^r + 2m^C q_2^r + \dots + m^C q_n^r \\ \vdots \\ b^E - b_n - b^C + m^C q_1^r + m^C q_2^r + \dots + 2m^C q_n^r \end{bmatrix} \quad (22)$$

위와 같은 모델링의 결과를 <표 1>과 같은 3대의 발전기로 구성된 간단한 전력시장에 적용하면 다음과 같다.

표 1. 발전회사별 발전비용 및 배출권 할당량에 대한 가정  
Table 1. Generation Costs and Emissions Targets

Generation Companies	Gen. costs $C_i(q_i) = a_i q_i + b_i$		Emission targets
	$a_i$	$b_i$	$q_i$
G1	0.3	10	120
G2	0.4	5	100
G3	0.5	3	80

전력시장 및 탄소배출권 시장의 가격은 각각  $P^E = -0.1d + 100$  및  $P^C = -0.2x_i + 25$ 로 주어졌다고 가정하였다. 이러한 시스템에 식(12)~식(14)를 적용한 결과는 다음과 같다.

$$\text{Max } \Pi_i(q_i) = \Pi_i^E(q_i) + \Pi_i^C(q_i), \quad i = 1, \dots, 3 \quad (23)$$

$$\text{Max } SW = SW_E + SW_C \quad (24)$$

$$\text{s.t. } d = q_1 + q_2 + q_3 \quad (25)$$

식(23)~식(25)의 해는 앞의 식(20)~식(22)에 <표 1>의 파라미터를 대입함으로써 내쉬균형점을 계산할 수 있으며, 그 결과를 <표 2>에 나타낸다. 표에서 전력시장 및 탄소배출권 시장의 가격은 각각의 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)

의 값을 통하여 계산한 결과이다. <표 2>의 가장 우측에 나타낸 바와 같이 만약 탄소배출권 시장이 없는 상태에서 탄소 감축 목표( $q_1=120\text{MWh}$ ,  $q_2=100\text{MWh}$ ,  $q_3=80\text{MWh}$ )를 달성해야 하는 경우에 비하여, 배출권 거래시장이 있는 경우 각 발전회사는 발전량을 증가시켜 전력시장에서의 수익을 증가시키고 부족한 배출권을 배출권 시장을 통하여 확보하는 전략을 통하여 수익을 증가시킬 수 있다.

### 3. 탄소배출권 시장이 전력시장에 미치는 영향에 대한 분석

앞 절의 예에서 볼 수 있듯이 제안된 모델의 내쉬균형 분석을 통하여 발전회사들은 전략적으로 수익을 극대화할 수 있는 발전량을 결정할 수 있다. 그러나, 전력시장 및 탄소배출권 시장의 파라미터가 시간에 따라 변동됨에 이러한 내쉬균형점은 지속적으로 변하게 된다. 특히, 발전회사의 탄소 감축비용의 상대적인 위치에 따라 발전회사의 수익을 극대화하는 균형점이 변동된다. 즉, 앞 절에서 설명한 바와 같이 다른 산업분야와의 상대적인 발전회사의 탄소감축비용인 식(6)의 파라미터인  $b^C$ 의 값에 따라 시장 운영 결과가 변동된다.

<표 3>에 나타낸 바와 같이  $b^C$ 의 값에 따라 발전회사들은 전력시장과 배출권시장에서의 입찰전략이 크게 변동된다. 예를 들어,  $b^C$ 의 값이 높은 경우( $b^C=25$ ), 즉 배출권 가격이 상대적으로 높은 경우에는 발전회사들은 발전량을 최대한 감축하여 목표량보다 더 많은 감축을 시행한 후에 잉여 배출권을 배출권 시장에 판매하여 추가 수익을 확보하려고 하며, 반면에  $b^C$ 가 낮은 경우( $b^C=5$ ), 즉 배출권 가격이 상대적으로 낮은 경우에는 최대 발전량을 증가시킨 후 부족한 배출권을 배출권 시장으로부터 구입하려는 입찰 전략을 수립한다. 한편  $b^C=15$ 인 경우에는 발전 부분의 탄소 감축비용과 다른 산업분야의 감축비용이 동일하여 발전회사가 다른 산업분야로부터 탄소 배출권을 구입하거나 판매하려는 동기가 없는 상황이라고 볼 수 있다.

이러한 파라미터  $b^C$ 를 어떻게 선정하느냐에 대한 연구는 보다 많은 연구가 필요하다. 향후 배출권 시장이 실제 개설된 이후에 충분한 데이터가 축적이 되면, 실적값의 회귀분석을 통하여 이 파라미터를 결정하는 것이 가장 일반적으로 고려될 수 있는 방법이라고 판단된다.

표 2. 모의 전력시장에 대한 내쉬 균형점의 계산 결과

Table 2. Nash equilibrium of sample electricity market with 3 generator power system

Generation Companies	Generation Amount [MWh]	$x_i$ [MWh]	$q_i^r$ [MWh]	Electricity Price [\$/MWh]	Carbon Price [\$/MWh]	Electricity Profits [\$]	Carbon Profits [\$]	Total Profits [\$]	Reference Profits [\$]
G1	107.76	12.24	120	71.9	21.2	4927	260	5187	5040
G2	93.80	6.20	100			4514	132	4646	4500
G3	79.57	0.43	80			3899	9	3908	3760
Sum	281.13	18.87	300	-	-	13,340	401	13,741	13,300

표 3.  $b^C$ 의 변동에 따른 내쉬 균형점의 변동

Table 3. Variation of Nash equilibriums of sample electricity market w.r.t.  $b^C$

Items	$b^C = 5$			$b^C = 15$			$b^C = 25$		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Generation Amount(MWh)	122.2	106.2	90.4	115.0	100.0	85.0	107.8	93.8	79.6
Reduction Target(MWh)	120	100	80	120	100	80	120	100	80
Surplus Emission Rights (MWh)	-2.2	-6.2	-10.4	5	0	-5	12.2	6.2	0.4
Behaviors of Gencos	Purchase	Purchase	Purchase	Purchase	No Trading	Sell	Sell	Sell	Sell
Elec. Price(\$/MWh)	68.1			70.0			71.9		
Carbon Price(\$/MWh)	8.8			15.0			21.2		
Elec. Profit (\$)	4862.3	4447.0	3843.8	4916.3	4500.0	3888.8	4927.2	4514.2	3898.5
Carbon Profit(\$)	-19.6	-54.4	-91.5	75.0	0.0	-75.0	259.7	131.6	9.1
Total Profit(\$)	4842.7	4392.6	3752.3	4991.3	4500.0	3813.8	5186.9	4645.8	3907.6

#### 4. 신재생에너지의 영향 분석

앞 절에서 살펴본 모의 전력시장은 화석연료를 사용하는 발전기만 3기가 있는 상황을 고려하였다. 이러한 전력시장에 충분한 용량의 신재생에너지가 건설될 수 있는 상황인 경우, 이러한 신재생에너지가 전력시장과 탄소배출권시장에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 제안된 모델을 이용하여 분석한 결과를 제시한다. 이미 잘 알려진 바와 같이 신재생에너지는 상대적으로 화석연료를 사용하는 발전기에 비하여 연료비는 거의 발생하지 않지만, 발전량이 증가할수록 운전유지비가 증가하므로 신재생에너지의 발전비용 역시 다음과 같은 함수로 가정될 수 있다.

$$C_N = \frac{1}{2} m_N q_N^2 + b_N q_N \quad (26)$$

또한, 신재생에너지의 전력시장과 배출권시장에서의 수익은 각각 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\Pi_N^E = P^E q_N - C_N(q_N) \quad (27)$$

$$\Pi_N^C = P^C q_N \quad (28)$$

다만, 신재생에너지의 경우는 탄소배출량이 이론적으로 0이므로 탄소감축목표량은 설정되지 않는 것으로 가정하였다. 이러한 신재생에너지가 존재하는 경우의 전력시장에 대한 모델링은 다음과 같다.

$$Max \Pi_i(q_i) = \Pi_i^E(q_i) + \Pi_i^C(q_i), \quad i = 1, 2, 3, N \quad (29)$$

$$Max SW = SW_E + SW_C \quad (30)$$

$$s.t. \quad d = q_1 + q_2 + q_3 + q_N \quad (31)$$

위의 식에 대한 해를 구하면 <표 4>에 나타난 바와 같다. 이 때  $m_N$  및  $b_N$ 은 각각 1.0과 50으로 가정하였다. 표에 나타난 바와 같이 각 발전회사들은 신재생에너지로부터 공급되는 추가적인 배출권으로 인하여 발전량이 소폭 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 신재생에너지의 추가적인 발전량과

표 4. 신재생에너지가 전력시장 및 배출권 시장에 미치는 영향 분석

Table 4. Impact of Renewable Energy on Market Equilibrium

		Generation Amount [MWh]	$x_i$ [MWh]	$q_i^r$ [MWh]	Electricity Price [\$/MWh]	Carbon Price [\$/MWh]	Electricity Profits [\$]	Carbon Profits [\$]	Total Profits [\$]	Total Welfare [\$]	
Without Renewable Energy	G1	107.76	12.24	120	71.9	21.2	4927	260	5187	17728	
	G2	93.80	6.20	100			4514	132			4646
	G3	79.57	0.43	80			3899	9			3908
With Renewable Energy	G1	109.7	10.3	120	68.6	16.8	4629	172	4802	18470	
	G2	95.5	4.5	100			4254	76			4330
	G3	81.1	-1.0	80			3678	-18			3661
	$G_N$	27.3	27.3	0			137	458			595

배출권으로 인해 전력 가격 및 배출권 가격이 모두 하락하는 효과도 발생하였다. 한편, 신재생에너지가 존재하는 경우 화력발전 회사들의 수익은 감소하였지만, 전체 사회적 후생은 증가하였음을 알 수 있는데, 이는 결국 총량제한 배출권 거래시장이 개설되면 기존 발전회사들이 적정한 용량의 신재생에너지 설비에 투자를 하여야만 수익을 유지하거나 증가시킬 수 있다는 점을 모형을 통하여 확인할 수 있었다.

### 5. 결론 및 향후연구

탄소 배출량을 효율적으로 감소하기 위하여 많은 국가들이 감축목표를 설정하고 이에 따른 총량 제한 배출권 거래시장을 개설하고 있으며, 우리나라도 '15년부터 배출권 거래시장이 개설될 예정이다. 전력시장과 배출권거래시장이 완전경쟁 시장인지 불완전 경쟁시장인지에 대한 분석은 많은 논의가 필요한 것이 사실이나, 우리나라의 경우 전력시장에 참여하는 발전회사의 수가 많지 않으며, 배출권 거래시장 역시 발전회사의 거래비중이 상당히 높은 비율을 차지할 것으로 예상된다. 이 점에서 두 시장의 형태가 불완전 경쟁 시장이 될 가능성이 있다.

따라서, 본 논문에서는 불완전 경쟁시장에서의 시장참여자의 입찰전략을 분석하기 위하여 가장 널리 사용되는 게임이론의 하나인 쿠르노 모형을 전력시장과 배출권 거래시장에 적용하여 발전회사가 수익을 극대화하는 균형점을 구하였다. 제안된 모델을 간단한 형태의 전력시장에 적용하여 봄으로써 본 연구에서 제안된 모델을 어떻게 활용할 수 있는지를 제시하였다.

향후 실제 우리나라의 전력계통에서 취득된 파라미터를 사용하여 실제 전력시장과 배출권거래시장에서의 발전회사의 전략적 입찰을 분석하는 연구가 진행될 예정이다.

### References

[1] J. Sijm, K. Neuhoff and Y. Chen, "CO<sub>2</sub> Cost Pass-through and Windfall Profits in the Power Sector", *Electricity Policy Research Group Working Paper*, EPRG 0617, May, 2006.  
 [2] E. Woerdman, O. Couwenberg and A. Nentjes, "Energy Prices and Emissions Trading: Windfall Profits from Grandfathering?," *European Journal of Law and Economics*, Vol. 28, No. 2, 2009, pp.185-202  
 [3] W. Kim, D. Chattopadhyay and J.B. Park, "Impact of Carbon Cost on Wholesale Electricity Price: A Note on Price Pass-Through Issues", *Energy*, Vol. 35, No. 8, Aug. 2010, pp.3441-3448  
 [4] R. Green, "Carbon tax or Carbon Permits: the Impact on Generators' Risks," *The Energy Journal*, Vol. 29, No. 3, 2008, pp.67-89  
 [5] H. Fell, *EU-ETS and Nordic Electricity: a CVAR Analysis*, Report No. RFFDP08-31, Resources for the Future, 2008

[6] E. Williams, "Greenhouse Gas Allowance Allocation: Cost Pass-Through, Sector Differentiation and Economic Implications," Working Paper No. NI WP 08-01, *Nicholas Institute for Environmental Policy Solution* (Center on Global Change), 2008  
 [7] L. Reedman, P. Graham and P. Coombes, "Using a Real-Options Approach to Model Technology Adoption under Carbon Price Uncertainty: an Application to the Australian Electricity Generation Sector," *The Economic Record*, Vol. 82, 2006, pp.S64-S73  
 [8] M. Ventosa, A. Baillo, A. Ramos and M. Rivier, "Electricity Market Modeling Trends," *Energy Policy*, Vol. 33, Issue 7, May 2005, pp.897-913  
 [9] S. Borenstein, J. Bushnell, E. Kahn and S. Stoft, "Market Power in California Electricity Markets," *Utility Policy*, Vol. 5, 1995, pp.219-236

### 저자 소개



#### 이광호(Kwang-Ho Lee)

1988년: 서울대학교 전기공학과 공학사  
 1990년: 서울대학교 전기공학과 공학석사  
 1995년: 서울대학교 전기공학과 공학박사  
 1996년~현재: 단국대학교 전자전기공학부 교수

관심분야 : Game theory, Power economics  
 Phone : +82-31-8005-3604  
 E-mail : khlee@dku.edu



#### 김욱(Wook Kim)

1990년: 서울대학교 전기공학과 공학사  
 1992년: 서울대학교 전기공학부 공학석사  
 1997년: 서울대학교 전기공학부 공학박사  
 1997년~2001년: LS산전 선임연구원  
 2002년~2003년: 삼성증권 연구위원  
 2003년~2011년: 한국남부발전 차장  
 2011년~현재: 부산대학교 전기공학과 조교수

관심분야 : Power economics, Optimization, Game theory  
 Phone : +82-51-510-2369  
 E-mail : kimwook@pusan.ac.kr