

온실가스 배출권 거래제도를 고려한 경쟁적 전력시장 모형 연구

논문

58-8-6

A Study on the Model of Competitive Electricity Market Considering Emission Trading

김 상 훈[†] · 이 광 호* · 김 옥**
(Sang-Hoon Kim · Kwang-Ho Lee · Wook Kim)

Abstract - The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) is an international environmental treaty to stabilize greenhouse gas concentrations in the atmosphere. In order to fulfil the commitments of the countries in an economically efficient way, the UNFCCC adapted the emission trading scheme in the Kyoto Protocol. If the UNFCCC's scheme is enforced in the country, considerable changes in electric power industry are expected due to the imposed greenhouse gas emission reduction. This paper proposes a game theoretic model of the case when generation companies participate in both competitive electricity market and emission market simultaneously. The model is designed such that generation companies select strategically between power quantity and greenhouse gas reduction to maximize their profits in both markets. Demand function and Environmental Welfare of emission trading market is proposed in this model. From the simulation results using the proposed model the impact of the emission trading on generation companies seems very severe in case that the emission prices are significantly high.

Key Words : Competitive Electricity Market, Emission Trading, Cournot Model, Nash Equilibrium

1. 서 론

기후변화협약(UNFCCC)에서는 각종 온실가스의 배출을 제한하기 위해 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol)를 채택하였다[1]. 우리나라는 기후변화협약 당시 개발도상국으로 분류되어 현재 감축 의무대상국은 아니지만, 세계 10위권 안에 들 만큼 많은 양의 온실가스가 배출되고 있어 향후 온실가스 감축 의무대상국에 포함될 가능성이 매우 높다. 우리나라 정부는 이러한 현실을 감안하여 2010년부터 배출권 거래제도를 시범 실시할 계획이다[2].

우리나라에 배출권 거래제도가 도입될 경우, 다른 어떠한 산업부문보다도 발전분야를 포함하는 전력부문에 미치는 영향이 가장 클 것으로 예상되는데, 그 이유는 배출되는 온실가스의 약 26%가 전력산업부문에서 배출되고 있어 단일 산업부문으로는 가장 많은 온실가스를 배출하고 있는데 반해, 필수 에너지인 전기의 사용량을 갑자기 줄이거나 온실가스 배출량의 대부분을 차지하고 있는 화석연료 기반의 발전소를 짧은 기간 내에 신재생에너지나 원자력 발전소로 대체하는 것은 현실적으로 불가능하여 많은 양의 배출권을 구입해야 하는 입장이기 때문이다. 전력시장의 입장에서는 온실가스 배출에 대한 비용을 발전원가에 반영하여 그 비용의 일정 부분을 소비자요금에 전가시키는 방식으로 시장의 형태가 변화될 가능성이 있으며, 온실가스 배출 비용이 원가에 반영됨에 따라 각 발전기들의 배

출량의 규모에 따라 급전순위가 변동되는 등 발전운영에서의 여러 가지 변화가 예상된다.

배출권 거래제도가 전력시장의 새로운 변수로 작용됨에 따라 배출권 거래가 전력부문에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 진행된 바 있다[3-6]. 그러나 이러한 연구들의 대부분은 설비 투자나 기술 개발 등 장기적으로 시행이 가능한 정책의 측면에서 배출권 거래제도에 대한 대응 방안을 다루고 있으며, 단기적인 관점에서 입찰전략의 수립이나 입찰전략에 따른 수익영향 분석에 대한 연구는 아직 초기단계에 있는 것으로 판단된다. 배출권 거래시장이 도입될 경우, 설비의 효율을 개선하여 온실가스 감축량을 줄이거나, CCS(Carbon Capture and Storage) 및 신재생에너지와 같은 설비를 도입하여 온실가스의 배출을 근본적으로 제한하는 것과 같은 중장기적인 전략도 중요하지만, 단기적으로는 이미 주어진 발전설비에 대하여 배출권 거래시장과 전력시장에서의 입찰전략을 효율적으로 수립하여 양쪽 시장에서의 단기적인 이익을 극대화하는 것 역시 발전회사의 입장에서 매우 중요하다.

본 논문의 가장 주된 목적은 발전회사가 배출권 거래시장과 전력시장의 양쪽 시장에서 동시에 거래를 수행하여야 할 때 이윤을 극대화하기 위한 입찰전략의 수립과정과 그 영향이 전력시장에 미치는 영향을 분석하고자 하는 것이다. 예를 들어, 배출권 시장이 도입되기 이전에는 연간 4000[GWh]를 발전할 때 전력시장에서의 이득이 극대화되는 한 발전소가 있다고 가정한다. 배출권 거래제도가 도입되어 이 발전기업에 연간 온실가스 배출량이 3800[GWh]의 발전량에 해당되는 양으로 할당되었다고 가정할 경우, 전력시장에서의 수익을 더 내고 싶은 경우, 연 4000[GWh]만큼 발전을 하되 그 초과 발전량인 200[GWh]에 해당하는 배출권을 구매해야 한다. 배출권 구매비용이

† 교신저자, 준회원 : 단국대 전기공학과 공학석사
E-mail : hoonsmile@dankook.ac.kr

* 정 회원 : 단국대 전자전기공학부 교수 · 공박

** 정 회원 : 한국남부발전 발전처 과장 · 공박

접수일자 : 2009년 3월 11일

최종완료 : 2009년 6월 19일

200[GWh]초과 발전량에 대한 전력시장의 수익보다 낮은 경우에, 발전기업은 초과 발전을 하여 추가 수익을 내려 할 것이다. 반면에 배출권 거래시장의 상황이 바뀌어 배출권 구매비용이 200[GWh]발전량에 대한 전력시장의 수익보다 높게 되면, 이 발전기업은 200[GWh]를 초과 발전하여도 전력시장에서 얻는 수익보다 배출권 구매에 들어가는 비용이 더 크기 때문에 3800[GWh]를 초과하여 발전하지 않을 것이다. 이때 발전기업은 연간 3800[GWh]에 해당하는 전력만 생산하려 하거나, 오히려 3800[GWh]의 발전량 미만의 발전을 하여 추가 감축한 만큼의 배출권을 거래시장에 판매하려 할 것이다. 이와 같이 대부분의 발전회사들이 배출권 거래시장과 전력시장 양쪽에 동시에 참여해야 하는 경우, 단기적으로 발전기업은 온실가스 감축량 선택에 따라 배출권 거래시장과 전력시장 양쪽의 이득에 영향을 받게 된다. 따라서 배출권 거래제도가 도입되면 기업의 이득을 극대화 할 수 있도록 온실가스 감축 할당량, 배출권 거래 가격 등을 고려하여 전략적으로 발전량과 감축량을 선택하기를 원할 것이다.

지금 현재 우리나라의 전력시장은 유사한 규모를 가진 소수의 발전회사가 각각 약 10% 내외의 시장점유율을 차지하고 있는 과점형태의 시장으로 볼 수 있다. 이러한 과점시장의 전력시장을 모델링하는 방법은 일반적으로 Cournot 모델, Bertrand 모델, 또는 공급함수 모델 등이 많이 사용된다[7]. 이 중 Cournot 모델은 시장참여자가 공급량을 결정하는 모형이며 시장참여자가 공급가능용량을 결정하는 우리나라 전력시장과 가장 유사하다. 따라서, 본 논문에서는 발전회사가 단기적으로 배출권 시장과 전력시장을 동시에 고려하여 이윤을 극대화하기 위하여 입찰량을 결정하는 과정을 Cournot 모형 형태로 모델링을 하였다. 즉, 발전기업이 자신의 이윤을 극대화하기 위하여 선택하는 발전량 및 온실가스 감축량을 Cournot 모형을 통하여 모델링을 하고, 그 모형을 과점 형태의 전력시장에 적용하여 배출권 거래시장과 전력시장을 동시에 고려한 내쉬균형점(Nash Equilibrium)을 계산하였다. 본 논문에서 수행한 모델링의 결과와 그 모델을 3모선을 가지는 예제 시스템에 적용하여 내쉬균형점의 계산 결과를 각각 제2절과 제3절에 설명한다. 결과적으로 배출권 거래시장에서의 거래가격의 변화가 시장참여자들의 발전량과 감축량 선택에 어떠한 영향을 미치는지 등을 제안 모형을 통하여 분석한 결과를 제4절 및 제5절에 설명한다.

2. 배출권 거래제도를 고려한 전력시장 모형화

본 절에서는 배출권 거래제도가 전력시장 참여자들의 발전운영에 미치는 영향을 알아보기 위해 배출권 거래제도와 전력시장의 관계를 고려하여 분석모형을 제안한다. 제안하는 모형은 전력시장과 배출권 거래시장의 관계를 고려하여 배출권 거래시장이 도입됨에 따라 시장참여자들에게 어떠한 영향을 주게 되는지 분석하는 데 사용될 것이다. 본 논문에서는 추후 우리나라에 배출권 거래제도 도입 시 감축목표량이 연간 단위로 할당되며, 이에 따라 발전기업은 이 연간 감축목표량에 대한 감축의무를 갖는다고 가정하였다.

2.1 전력시장 모형화

일반적인 경쟁 전력시장에서는 발전기업들이 전력시장에서의 수요, 경쟁기업들의 발전량, 그리고 발전비용을 고려하여 발전량을 선택하게 된다. 하지만 배출권 거래제도가 도입되면, 발전기업들은 온실가스 감축목표량 또한 고려하여 발전량뿐만 아니라 온실가스 감축량을 선택하여야 한다. 전력시장에서 발전기업의 일반적인 한계비용특성은 시간대별 비용특성을 의미한다. 하지만, 온실가스 감축 목표량은 시간 단위가 아니라 연간 단위로 할당된다. 따라서 본 논문에서는 발전기업이 연간 한계비용특성을 추정하여 연간 발전량과 감축량을 선택한다고 가정하였다. 이에 따라 화력발전의 한계비용특성, 그리고 탄력성이 부여된 전력시장에서의 수요를 다음의 식(1)과 식(2)과 같이 정의한다.

$$C_i'(q_i) = m_i q_i + b_i \tag{1}$$

$$D(d) = -m_0 d + b_0 \tag{2}$$

식(1)의 $C_i'(q_i)$ 는 발전기업 i 가 q_i 만큼 발전하는 경우의 연간 한계비용함수이며 m_i 와 b_i 는 각각 한계비용함수의 1차계수와 상수항이다. 식(2)의 D 는 연간 수요특성을 의미하며 이때 d 는 전력의 연간 수요량, b_0 는 연간 수요함수의 절편, 그리고 m_0 는 연간 수요함수의 기울기이다. 여기서 식들의 표현은 일반적인 전력시장에서의 한계비용특성과 같으나, 배출권 거래시장과의 연동성을 고려하기 위해 연간 단위의 수식이라는 것이 차이점이다.

발전기업에게 연간 온실가스 감축목표량이 할당되면, 발전기업은 이를 전력량으로 환산하여 감축의무를 달성하는 경우의 발전량을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 이 전력량을 발전기업 i 의 연간 감축목표량 $q_{i,r}$ 로 정의하며, 이때 x_i 는 $q_{i,r}$ 을 기준으로 온실가스를 추가 감축한 전력량으로 정의한다. 다음의 그림 1은 이러한 발전기업 i 의 입장을 고려하여 연간 한계비용특성 C_i' 과 감축목표량 $q_{i,r}$, 연간발전량 q_i , 그리고 연간 추가감축량 x_i 의 관계를 그래프로 나타낸다.

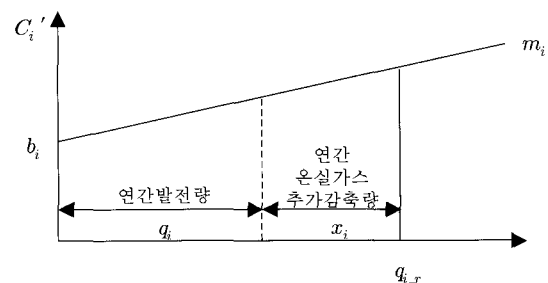


그림 1 발전기업의 연간 한계비용특성과 각 파라미터의 관계
Fig. 1 Marginal Cost and Relationship Between Parameters

발전기업은 전력시장과 배출권거래시장의 상황에 따라 세 가지의 행동유형을 보인다. 첫 번째 행동유형은, 연간 온실가스 감축목표량인 $q_{i,r}$ 만 발전하여 배출권 거래시장에서의 배출권 구매 및 판매 없이 전력시장에서만 수익을

내는 경우이다. 두 번째는, 감축목표량인 $q_{i,j}$ 에서 추가적으로 x_i 만큼 감축하는 경우이다. 이때 발전기업은 x_i 에 해당하는 배출권을 거래시장을 통해 판매할 수 있으며 전력시장에서의 수익과 배출권 거래시장에서의 수익이 모두 존재한다. 세 번째는, 감축목표량인 $q_{i,j}$ 에서 $-x_i$ 만큼 초과 발전하는 경우이다. 발전기업은 초과 발전하는 양인 $-x_i$ 에 대해서는 배출권 거래시장을 통해 배출권을 구매해야 한다. 따라서 전력시장에서는 전력량에 대한 수익이 발생하지만, 배출권 거래시장에서는 지출이 생기게 되는 경우이다.

그림 1을 보면 $q_{i,j} = q_i + x_i$ 임을 알 수 있다. 따라서 앞서 설명한 바와 같이 $q_{i,j} = q_i$ 인 경우에는 $x_i = 0$ 이 되어 발전기업 i 는 첫 번째 행동유형의 상황과 같이 배출권 거래 없이 온실가스 배출 할당량에 해당하는 만큼만 발전한다. $q_{i,j} > q_i$ 인 경우는 두 번째 행동유형에 해당한다. 이때는 $x_i > 0$ 이 되어 x_i 에 해당하는 만큼의 배출권을 판매할 수 있다. 반대로, $q_{i,j} < q_i$ 인 경우에는 $x_i < 0$ 이 되어 $-x_i$ 에 해당하는 만큼의 배출권을 구매해야 되는 세 번째 행동유형이 나타남을 알 수 있다.

발전기업은 감축목표량 $q_{i,j}$ 을 만족하는 발전량 q_i 와 추가 감축량 x_i 를 전략적으로 선택해야 한다. 하지만 이때 $q_{i,j} = q_i + x_i$ 의 관계에 있으므로 발전기업이 선택해야 하는 변수는 사실상 하나가 된다. 온실가스 감축목표량이 할당 되면, $q_{i,j}$ 은 고정된 값이며, 발전량 q_i 를 전략적으로 선택함으로써 추가감축량 x_i 또한 자동적으로 선택되기 때문이다.

2.2 배출권시장 모형화

발전기업들은 온실가스 감축목표량이 결정됨에 따라 발전비용특성과 배출권 거래가격을 고려하여 발전량과 감축량을 선택한다. 배출권 거래가격은 시장원리에 따라 배출권에 대한 수요가 많은 경우에 높게 형성될 것이며, 배출권에 대한 수요가 적은 경우에는 낮게 형성될 것이다. 본 논문에서는 배출권 거래가격결정을 전력산업부문의 관점에서 모형화 하였다.

앞서 정의된, 발전기업 i 의 추가감축량 x_i 는 전력산업부문 배출권 거래시장의 거래가격에 많은 영향을 주게 된다. 만약 배출권에 대한 수요가 많다면 배출권 거래가격이 높게 형성될 것이고, 이때는 발전기업들이 x_i 만큼의 추가 감축을 시도하여 배출권 거래시장에서의 수익을 노릴 것이다. 하지만 전력산업부문 배출권 거래시장에서 추가 감축을 하여 배출권을 판매할수록, 다른 산업부문에서는 배출권을 구매하여 감축의무를 달성하게 된다. 따라서 점차 우리나라에 할당된 온실가스 감축목표량에 가까워져 배출권에 대한 수요는 줄어들게 되고, 이에 따라 배출권 거래가격이 낮아지게 될 것이다. 그러므로 전력부문의 배출권 거래가격은 총 추가감축량 x_i 의 증가에 대하여 거래가격이 낮아지는, 다음의 식(3)과 같은 특성이 나타나게 될 것이다. 식(3)에서 P_E 는 전력산업에서 발전기업들의 추가 감축량 합이 $x_i (= \sum x_i)$ 인 경우의 배출권의 거래가격을 의미하며, m_E 와 b_E 는 각각 배출권 거래가격 함수의 기울기와 절편이다.

$$P_E = -m_E x_i + b_E \tag{3}$$

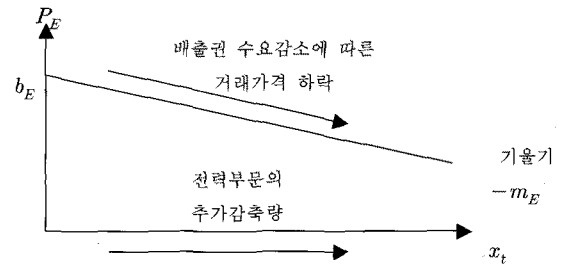


그림 2 배출권 거래가격함수
Fig. 2 Marginal Price of Emission Trading

그림 2는 배출권 거래가격 P_E 와 거래가격을 그래프로 나타낸 것이다. P_E 는 전력산업부문 관점에서의 배출권 거래가격이다. 온실가스 배출량은 국가별로 할당되어 국가 내에서 다시 산업별, 기업별로 할당되는데, 전력산업부문의 배출권 거래가격은 다른 산업부문의 온실가스 감축비용에 영향을 받는다. 만약 다른 산업부문의 온실가스 감축비용이 전력산업부문의 감축비용보다 높게 되면, 다른 산업부문의 기업은 전력산업부문에서의 배출권을 구매하려 할 것이며, 이는 전력부문의 한계감축비용의 상승, 즉 전력부문 배출권의 거래가격 상승으로 나타나게 된다. 반대로, 다른 산업의 온실가스 감축비용이 전력부문의 감축비용보다 낮은 경우에는 전력산업부문의 발전기업들이 다른 산업부문 배출권을 구매하려 할 것이며 이는 결국 전력부문의 배출권의 유입이 증가하여 전력산업부문 배출권 거래가격의 하락으로 나타나게 된다. 이때 발전기업들은 추가감축을 이행하지 않거나, 오히려 전력시장에서 감축목표량을 초과하여 발전, 전력시장에서의 수익을 얻고 저렴한 가격으로 다른 산업부문에서의 배출권을 구매함으로써 발전기업의 이득을 극대화하려는 움직임을 보일 것이라 예상할 수 있다.

이와 같이 전력산업부문 관점에서의 배출권 거래가격은 다른 산업부문의 감축비용의 영향을 받아 높게, 혹은 낮게 형성되는데, 본 연구에서는 이러한 영향을 식(3)과 그림 2의 배출권 거래가격함수에서의 절편 b_E 로 표현하였다. 전력산업부문 배출권 거래가격의 상승은 b_E 가 큰 경우이며, 거래가격의 하락은 b_E 가 낮은 경우이다.

배출권 거래시장을 고려함에 따라 새로운 시장거래가치 또한 나타난다. 전력시장에서는 소비자효용에서 발전비용을 뺀 사회적후생(Social Welfare ; SW)이 시장거래가치를 가늠하는 척도로 사용된다. 하지만 배출권 거래시장이 도입되면, 배출권 거래시장에서도 시장거래가치를 나타내는 척도가 고려되어야 한다. 본 논문에서는 배출권 거래가격 P_E 를 총 추가감축량 x_i 로 적분한 수치를 환경적후생(Environmental Welfare ; EW)으로 정의한다. 만약 배출권 거래가격함수가 상승하게 되면, 배출권 거래량 x_i 또한 커지는 쪽으로 유도되고, 이는 면적의 증가로 이어져 온실가스 감축에 따른 목표달성도가 높아질 것이다. 반면에 배출권 거래가격함수가 하락하게 되면, x_i 가 작아지는 쪽으로 유도되고, 이는 곧 배출권 거래량의 감소이므로 온

실가스 감축에 따른 목표달성도가 작아질 것으로 예측할 수 있다.

3. 내쉬균형 계산

3.1 최적화 문제 표현

3.1.1 발전기업의 이득

온실가스 배출권 거래제도가 도입되면, 발전기업은 전력시장에서 발생하는 이득과 배출권 거래시장에서 발생하는 이득을 모두 극대화시키려 노력할 것이다. 이때 발전기업은 이득을 극대화시키는 발전량과 추가감축량을 선택한다. 발전기업의 전력시장과 배출권 거래시장에서의 이득은 각각 다음 식(4)와 식(5)로 나타난다.

$$\Pi_{i,P} = P_i q_i - C(q_i) \tag{4}$$

$$\Pi_{i,E} = P_E x_i \tag{5}$$

식(4)에서 $\Pi_{i,P}$ 는 발전기업 i의 전력시장에서의 이득을 나타내며 전력거래를 통해 얻는 총 수익에서 실제 발전에 따른 비용을 뺀 값으로 구할 수 있다. 이때 $P_i (= -m_i d + b_i)$ 는 수요에 의한 전력시장의 거래가격이고, $C(q_i)$ 는 발전비용으로 $C'(q_i)$ 을 발전량 q_i 로 적분하여 구할 수 있다. 식(5)의 $\Pi_{i,E}$ 는 발전기업 i의 배출권 거래시장에서의 이득을 나타내며, 이때 $P_E (= -m_E x_i + b_E)$ 는 배출권시장의 거래가격이다. 배출권 거래시장에서의 발전기업 이득은 식(5)와 같이 배출권 거래를 통해 얻는 총 수익으로 구할 수 있다. 하지만 엄밀히 말하면, 식(5)는 그 금액이 양의 값일 수도, 음의 값일 수도 있기 때문에 발전기업에게 이득이 될 수도, 지출이 될 수도 있다.

3.1.2 시장거래가치

전력시장의 시장거래가치는 소비자효용(Benefit)에서 발전비용(Cost)을 뺀 값으로 정의되는 사회적후생이다. 소비자효용은 전력구매자의 의지를 나타내는 것으로 수요곡선을 총 거래량으로 적분하여 구할 수 있으며, 이를 통해 사회적후생을 정식화하면 다음 식(6)과 같다. 이때 SW 는 사회적후생이며 $B(d) (= -0.5m_0 d^2 + b_0 d)$ 는 소비자효용, 그리고 $d (= \sum q_i)$ 는 전력수요량을 의미한다.

$$SW = B(d) - \sum C_i(q_i) \tag{6}$$

배출권 거래제도가 도입되면 전력시장 뿐만 아니라 배출권 거래시장에서의 시장거래가치 또한 존재하게 된다. 배출권 거래시장에서의 시장거래가치는 앞서 정의한, 환경적후생이다. 환경적후생은 배출권 거래시장의 거래가격 함수를 총 추가감축량으로 적분하여 구할 수 있으며, 다음 식(7)은 이러한 환경적후생을 정식화한 것이다.

$$EW = -\frac{1}{2} m_E x_i^2 + b_E x_i \tag{7}$$

배출권 거래시장과 전력시장을 함께 고려한다면 사회

적후생과 환경적후생 모두 시장거래가치가 될 것이다. 따라서 본 논문에서는 이 두 후생의 합을 복합적후생(Combined Welfare : CW)으로 정의하여 $CW = SW + EW$ 와 같이 정식화한다.

3.1.3 2단계 최적화 문제

발전기업은 전력시장과 배출권 거래시장의 이득을 합하여 이득극대화 문제를 계산함으로써 발전량과 감축량을 선택할 수 있다. 다음의 식(8)은 이러한 발전기업의 최적화 문제를 표현하고 있으며, 발전기업의 총 이득은 전력시장에서의 이득 표현인 식(4)와 배출권 거래시장에서의 이득 표현인 식(5)의 합으로 나타난다.

$$\max \Pi_i(q_i) = \Pi_{i,P} + \Pi_{i,E} \tag{8}$$

식(8)에서 발전기업 이득극대화 문제의 변수는 q_i 이며, q_i 를 결정함으로써 $q_{i,T} = q_i + x_i$ 의 관계에 따라 추가감축량 x_i 또한 함께 결정하게 된다. 즉, 발전기업은 전략적으로 발전량 q_i 를 선택함으로써 발전사의 이득을 극대화시킬 수 있는 것이다. 시장거래가치 측면에서는, 다음의 식(9)와 같이 복합적후생의 극대화 문제로 표현될 수 있다.

$$\max CW(d) = SW + EW \tag{9}$$

위에서 표현된 CW 는 사회적후생과 환경적 후생의 합이다. 이때 사회적후생은 소비자효용에서 발전비용을 뺀 값이며, 발전비용은 식(8)에서 발전기업이 이득을 극대화시키는 발전량을 선택하여 결정된다. 또한 전력구매자는 전력시장에서 소비자효용을 극대화하는 전력거래량을 선택하려 할 것이며, 결과적으로 CW 가 극대화된다.

배출권거래를 고려하는 전력시장 모형은 위와 같이 식(8)과 (9)의 2단계 최적화문제[8]로 표현되어지며, 이때의 균형을 계산함으로써 발전기업은 이득을 극대화하는 발전량과 추가감축량을 선택할 수 있고 전력구매자 측면에서는 시장원리에 따라 자연스럽게 소비자효용과 시장거래가치가 극대화되는 전력거래량이 선택된다.

3.2 쿠르노 균형 계산

제한한 분석 모형의 균형을 계산하기 위해, 본 논문에서는 다음 그림 3과 같은 대상계통을 사용한다. 대상계통은 그림에서와 같이 각 모선에 화력발전소가 있으며, 3모선에 부하가 집중되어 있는 3모선계통을 가정한다.

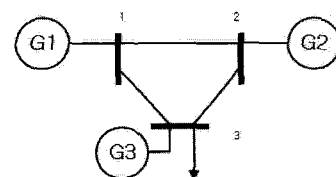


그림 3 3모선 계통을 가지는 전력시장

Fig. 3 Sample Electricity Market with 3-bus Power System

이때 각 발전기업들의 최적화는 식(8)을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\max \Pi_1(q_1) = \Pi_{1,P} + \Pi_{1,E} \quad (10)$$

$$\max \Pi_2(q_2) = \Pi_{2,P} + \Pi_{2,E} \quad (11)$$

$$\max \Pi_3(q_3) = \Pi_{3,P} + \Pi_{3,E} \quad (12)$$

여기서 식(10)~(12)는 각 발전기업의 이득극대화를 수식으로 표현한 것이다. 발전기업들은 이득을 극대화시키는 발전량 q_1, q_2, q_3 그리고 추가감축량 x_1, x_2, x_3 을 각각 $\partial \Pi_1 / \partial q_1 = 0, \partial \Pi_2 / \partial q_2 = 0, \partial \Pi_3 / \partial q_3 = 0$ 의 최적조건 식으로 구할 수 있다. 대상계통에서의 시장거래가치 극대화는, 식(9)를 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\max CW(d) = SW + EW \quad (13)$$

$$s.t \quad d = q_1 + q_2 + q_3$$

시장거래가치인 복합적후생의 극대화 표현인 식(13)에서 $d = q_1 + q_2 + q_3$ 는 전력시장에서의 수급조건으로, 이 제약 조건을 포함하여 최적화문제를 풀기 위해서, 식(13)을 다음 식(14)와 같이 라그랑지안 함수로 표현한다.

$$L = CW + \lambda(q_1 + q_2 + q_3 - d) \quad (14)$$

여기서 전력구매자는 시장거래가치를 극대화시키는 전력수요량 d 를 $\partial L / \partial d = 0$ 와 $\partial L / \partial \lambda = 0$ 의 최적조건 식으로 구할 수 있다. 이와 같이 $\partial \Pi_1 / \partial q_1 = 0, \partial \Pi_2 / \partial q_2 = 0, \partial \Pi_3 / \partial q_3 = 0, \partial L / \partial d = 0, \partial L / \partial \lambda = 0$ 의 최적조건들을 계산함으로써, 2단계 최적화문제를 풀 수 있다. 다음은 이러한 2단계 최적화문제의 최적조건식을 선형결합으로 나타낸 것이다. 만약 발전기업들이 보다 많아질 경우에는 $\partial \Pi_1 / \partial q_1 = 0, \partial L / \partial d = 0, \partial L / \partial \lambda = 0$ 와 같이 최적조건 식을 구한 후 선형결합을 확장하여 구해낼 수 있다.

그림 3과 같은 대상계통에서 각 발전기업의 연간한계비용특성과 감축목표량, 그리고 수요특성과 배출권 거래가격 특성이 $m_1 = 0.3, b_1 = 10, q_{1,r} = 120, m_2 = 0.4, b_2 = 5, q_{2,r} = 100, m_3 = 0.5, b_3 = 3, q_{3,r} = 80, m_0 = 0.1, b_0 = 100, m_E = -0.2, b_E = 25$ 와 같다면 식(15)를 이용하여 내쉬균형 결과를 계산할 수 있다. 다음의 표 1은 발전기업이 내쉬균형에서의 발전량과 감축량을 선택하는 전략과, 감축목

표량의 발전량을 선택하는 전략의 이득을 비교한 것이다.

배출권 거래시장이 도입되지 않은 상황에서 발전기업에게 감축목표량이 할당되면, 발전기업은 감축의무를 다하기 위하여 감축목표량에 해당하는 $q_1 = 120, q_2 = 100, q_3 = 80$ 만큼 발전할 것이다. 반면에 배출권의 거래가 도입된다면, 발전기업은 표 1에서와 같이 균형전략을 선택함으로써 발전과 추가감축을 $q_1 = 107.76, x_1 = 12.24, q_2 = 93.80, x_2 = 6.20, q_3 = 79.57, x_3 = -0.43$ 만큼 이행한다. 두 상황의 이득을 비교해 보면, 발전기업 모두 배출권 거래가 이루어질 때 추가감축량에 의한 배출권 거래 이득이 발생하여 총 이득은 $5040 \rightarrow 5186.90, 4500 \rightarrow 4645.84, 3760 \rightarrow 3907.59$ 로 상승함을 알 수 있으며, 이러한 결과는 배출권 거래제도가 시장참여자의 온실가스 감축에 대한 유인을 제공함을 보여준다.

4. 배출권 거래제도가 전력시장에 미치는 영향

4.1 시장참여자 행동유형에 미치는 영향

발전기업은 균형전략으로 이득을 극대화하는 발전량과 추가감축량을 선택할 수 있다. 하지만 발전기업의 균형 전략은, 배출권 거래시장의 상황에 따라 변하게 된다. 배출권 거래가격은 앞 2.2절에서 소개한 바와 같이 다른 산업부문에서의 감축비용과 전력산업부문에서의 감축비용의 상관관계에 따라 변화되는데, 본 절에서는 이러한 배출권 거래가격의 변화가 발전기업에게 어떠한 영향을 미치는가를 분석한다. 배출권 거래가격의 변화는 거래가격 함수의 절편 b_E 로 나타난다. 따라서 배출권 거래가격 함수의 b_E 를 변화시켜 가며 시장의 균형결과를 비교분석한다.

배출권 거래가격에 따른 발전기업의 행동유형을 분석하기 위해, 배출권 거래가격이 결정되는 상황에 대해서 먼저 고찰해 보아야 한다. 먼저 전력부문에서의 감축비용과 다른 산업에서의 감축비용이 비슷하다고 한다면, 전력부문에서의 배출권 거래비용함수의 b_E 는 큰 변화가 없을 것이며, 다른 산업과의 배출권 거래 없이 전력부문의 배출권 거래만으로 온실가스 감축의무를 다하게 될 것이다.

전력부문에서의 감축비용 보다 다른 산업에서의 감축비용이 더 높은 시장 상황에서는, 전력부문 거래가격함수의 b_E 또한 높아지게 된다. 따라서 전력부문에서의 추가감

$$\begin{pmatrix} d \\ \lambda \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \begin{vmatrix} b_0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ b_0 & 0 & b_1 + 2b_E + b_0 \partial d / \partial q_1 & b_E & b_E \\ b_0 & 0 & b_E & b_2 + 2b_E + b_0 \partial d / \partial q_2 & b_E \\ b_0 & 0 & b_E & b_E & b_3 + 2b_E + b_0 \partial d / \partial q_3 \end{vmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} a_0 \\ 0 \\ a_0 - a_1 - a_E + 2b_E q_{1,r} + b_E q_{2,r} + b_E q_{3,r} \\ a_0 - a_2 - a_E + b_E q_{1,r} + 2b_E q_{2,r} + b_E q_{3,r} \\ a_0 - a_3 - a_E + b_E q_{1,r} + b_E q_{2,r} + 2b_E q_{3,r} \end{pmatrix} \quad (15)$$

표 1 3모선 계통 대상모형에서의 내쉬균형

Table 1 Nash Equilibrium of Sample Electricity Market with 3-Bus Power System

구분	발전량	추가 감축량	감축 목표량	전력 거래가격	배출권 거래가격	전력시장 이득	배출권 시장이득	총 이득	비교이득
발전기업1	107.76	12.24	120	71.89	21.23	4927.18	259.72	5186.90	5040
발전기업2	93.80	6.20	100			4514.20	131.64	4645.84	4500
발전기업3	79.57	0.43	80			3898.54	9.05	3907.59	3760

표 2 배출권 거래가격에 따른 내쉬균형

Table 2 Nash Equilibrium According to Emission Trading Price

구분	$b_E = 5$			$b_E = 15$			$b_E = 25$		
	발전기업1	발전기업2	발전기업3	발전기업1	발전기업2	발전기업3	발전기업1	발전기업2	발전기업3
발전량	122.24	106.20	90.43	115	100	85	107.76	93.80	79.57
감축목표량	120	100	80	120	100	80	120	100	80
추가감축량	-2.24	-6.20	-10.43	5	0	-5	12.24	6.20	0.43
행동유형	배출권구매	배출권구매	배출권구매	배출권구매	거래없음	배출권판매	배출권판매	배출권판매	배출권판매
전력거래가격	68.11			70			71.89		
배출권거래가격	8.77			15			21.23		
전력시장이익	4862.32	4447.02	3843.76	4916.25	4500.00	3888.75	4927.18	4514.20	3898.54
배출권시장이익	-19.61	-54.40	-91.47	75.00	0.00	-75.00	259.72	131.64	9.05
시장 총 이익	4842.71	4392.61	3752.30	4991.25	4500.00	3813.75	5186.90	4645.84	3907.59

축이 유도되고, 이 추가감축되는 양 만큼의 배출권이 다른 산업부문에 판매될 것이다.

이와는 반대로 전력부문에서의 감축비용보다 다른 산업에서의 감축비용이 더 낮은 시장 상황에서는, b_E 또한 낮아지게 되어 전력부문에서는 온실가스 할당량을 초과하는 발전이 이루어지고, 이 초과 발전되는 양 만큼의 배출권을 다른 산업부문으로부터 구매해야 할 것이다. 표 2는 대상계통에서의 이러한 b_E 의 변화에 따른 각 발전기업의 균형전략과 그에 따른 행동유형을 보여주고 있다.

표 2를 보면, 배출권 거래가격의 변화에 따라 각 발전기업의 행동유형이 달라지는 것을 알 수 있다. 온실가스 배출권 거래가격이 상대적으로 높은, $b_E=25$ 인 경우는 앞서 설명한 바와 같이 다른 산업에 비해 전력산업 부문의 온실가스 감축비용이 상대적으로 저렴하여 배출권 거래비용이 높게 형성된 경우이다. 이때 세 발전기업은 모두 온실가스 배출량을 추가 감축하여 배출권을 판매함으로써 배출권 거래시장에서 이익을 취하게 된다.

배출권 거래가격이 상대적으로 낮은, $b_E=5$ 인 경우는 발전산업 부문의 온실가스 감축비용에 비해 다른 산업의 감축비용이 상대적으로 낮은 경우이다. 따라서 세 발전기업 모두 온실가스 할당량보다 오히려 더 발전하여 전력시장에서의 이익을 높이고, 배출권 거래시장에서는 다른 산업부문으로부터의 배출권을 구매하게 된다. 이때 발전기업들의 배출권 거래를 통한 이익을 보면 각각 -19.61, -54.40, -91.47로 지출이 생기는 것을 확인할 수 있다. 하지만 발전기업들은 저렴한 비용으로 배출권을 구매하여 감축목표량을 달성하고, 그만큼 발전량을 증가시킴으로써 발전기업의 이익을 극대화 하게 된다.

배출권 거래가격이 높지도, 낮지도 않은 $b_E=15$ 의 경우는 전력부문의 온실가스 감축비용이 다른 산업의 감축비용과 비슷한 경우이다. 이때는 발전기업 1이 추가적으로 감축한 5만큼의 배출권을 발전기업 3이 구매함으로써 온실가스 감축의무를 다하게 되며, 발전기업 2는 감축 목표량 만큼만 발전하여 배출권 거래에는 참여하지 않는다.

이와 같이, 온실가스 배출권 거래가격이 시장상황에 따라 변화하게 되면, 발전기업의 행동유형도 따라 변하게 된다. 발전기업의 균형전략은 발전기업의 발전량과 감축량의 선택이기 때문에, 결과적으로 배출권 거래가격의

변화는 발전기업이 추가감축을 하여 배출권을 판매할지, 아니면 배출권을 구매하고 감축목표량을 초과하여 발전을 할지 등의 행동유형의 변화로 이어짐을 분석하였다.

4.2 감축량과 환경적 후생에 미치는 영향

앞 4.1 절에서는 시장상황에 따른 거래가격이 발전기업의 균형전략을 변화시키게 되고, 결과적으로 발전기업의 행동유형을 변화시키게 되는 영향을 살펴보았다. 본 절에서는 배출권 거래가격의 변화가 각 발전기업의 온실가스 추가감축량에 미치는 영향을 분석한다.

배출권 거래가격의 절편 b_E 가 높아지는 것은, 전력부문 배출권 거래가격의 상승을 의미한다. 배출권 거래가격의 상승은 발전기업들의 추가감축을 유도하게 되고, 이에 따라 온실가스 추가감축 달성지표인 환경적 후생이 높은 수치를 나타나게 될 것이라고 예측할 수 있다. 다음의 표 3은 이러한 배출권 거래가격의 상승에 따른 내쉬균형에서의 추가감축량 변화와 환경적 후생을 나타내고 있으며, 그림 4는 이를 그래프로 표현한 것이다.

표 3 배출권 거래가격에 따른 발전기업 감축량과 환경적 후생
Table 3 Reduction and EW According to Emission Trading Price

배출권 거래가격 합수의 절편 (b_E)	5	10	15	20	25	30
발전기업1 추가감축량 (x_1)	-2.24	1.38	5.00	8.62	12.24	15.85
발전기업2 추가감축량 (x_2)	-6.20	-3.10	0.00	3.10	6.20	9.30
발전기업3 추가감축량 (x_3)	-10.43	-7.71	-5.00	-2.29	0.43	3.14
환경적 후생(EW)	-129.90	-103.21	0.00	179.74	435.99	768.78

표 3을 보면 b_E 가 커질수록, 즉 배출권 거래가격이 높아지면 높아질수록 각 발전기업들은 모두 추가감축을 늘리는 쪽으로 발전량과 감축량을 선택하게 되고, 환경적 후생 또한 늘어나게 됨을 확인할 수 있다. 이를 그림 4를

통하여 분석해 보면, 배출권 거래시장에서의 거래가격이 높아질수록 시장참여자들의 추가감축량이 유도 되고, 이에 따라 배출권 거래가 늘게 되어 배출권 거래시장에서의 시장거래가치인 환경적후생이 늘어나게 되는 것을 알 수 있다. 특히 그림 4 오른쪽 그림에서 $b_E=5$ 인 상황은, 전력 부문에서 배출권을 구매하는 상황이다. 이때는 배출권 거래량이 $x_i < 0$ 이 되므로 환경적후생이 음의 값을 갖는다. 또한 $b_E=15$ 인 상황을 살펴보면, 배출권 판매와 구매가 전력산업 부문 내에서 모두 이루어져 전력부문의 배출권거래에 대한 환경적후생이 '0'임을 알 수 있다.

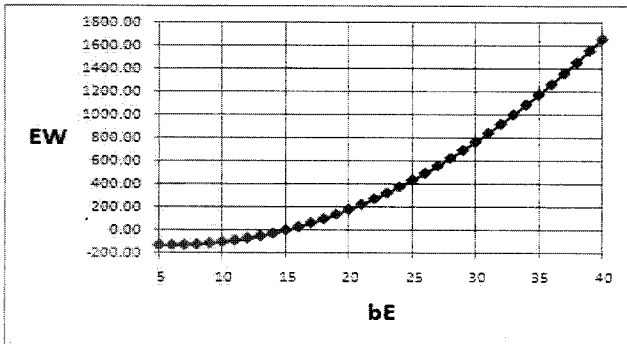
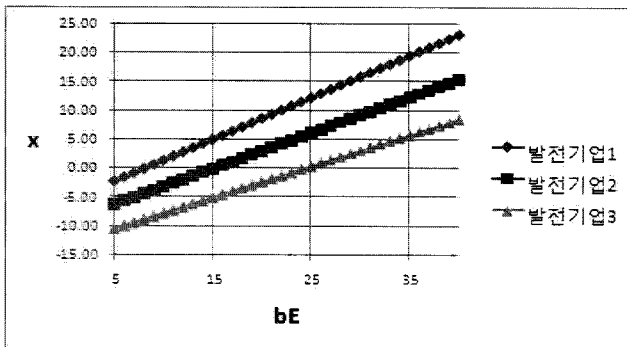


그림 4 거래가격(b_E) 변화에 따른 발전기업 감축량 변화(x)와 환경적 후생(EW) 변화

Fig. 4 Graphs of generation reductions and EW According to Emission Trading Price

5. 결 론

본 논문에서는 배출권 거래시장과 연계된 전력시장 모형에 대하여 분석하였다. 배출권 거래제도가 도입되면 발전기업은 전력시장 뿐만 아니라 배출권 거래시장에서의 이득 또한 고려할 것이다. 이에 발전기업이 연간 감축량과 발전량을 전략적으로 선택하는, 배출권 거래시장과 전력시장의 모형을 제안하였다. 배출권 거래시장 모형화 과정에서 배출권 수요함수를 도입하였고, 시장거래가치로서의 환경적후생 개념을 제안하였다. 제안한 모형에서 시장참여자들의 최적화 문제를 정식화하여 시장균형을 유도하였으며, 배출권 거래제도를 도입함에 따라서 전력시장

에서 어떠한 현상이 나타나게 되는지를 분석하였다.

배출권 거래시장과 연계된 경쟁적 전력시장에서는 배출권 거래시장에서의 가격형성이 중요한 의미를 갖는다. 배출권 거래가격이 높아지면, 시장참여자들은 발전량은 줄이고 온실가스 추가감축을 이행하여 배출권 거래시장에서 더 많은 이득을 취하려는 현상이 나타난다. 반대로 배출권 거래가격이 낮아지는 상황에서는, 시장참여자들이 배출권을 구매하여 더 발전하는 현상을 보였다.

본 연구의 결과는 추후 관련 연구에서의 활용 가능성이 높다. 물론 지금 시행되고 있는 우리나라의 전력시장의 형태는 일부 양수발전 설비를 제외하면 발전회사가 스스로 발전량을 선택할 수 있는 자기급전(Self-Commitment)의 권한이 전혀 없기 때문에 본 논문의 이론을 직접 적용하는 것은 다소 거리가 있는 것으로 판단된다. 하지만, 향후 도입을 검토하고 있는 가격입찰시장(Price Bidding Pool) 등의 제도[11]를 통해 자기급전권이 허용된다면 배출권 거래시장과의 연관관계를 분석하여 이윤을 극대화할 수 있는 발전량을 결정하기 위하여 시도를 할 것으로 예상된다. 따라서, 본 논문의 결과는 이러한 분석을 위하여 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 또한 배출권 시장을 도입하는 과정에서 시장설계부처나 운영규칙 분석에 사용될 수 있으며, 안정된 시장운영과 시장참여자들의 건전한 경쟁을 위해 발전기업들이 중장기적으로 운영전략을 결정하는 데에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 유엔환경계획 한국위원회, *교토의정서*, 유넵프레스, 2002
- [2] 국무총리실 기후변화기획단, *기후변화대응 종합기본계획 상세자료*, 2008. 9.
- [3] Ramanathan, "Short-term energy and emission trading analysis," *IEEE trans. on Power System*, vol. 10, No. 2, pp. 1118-1124, May. 1995.
- [4] J. Sijm, K. Neuhoff and Y. Chen, "CO2 Cost Pass-Through and Windfall Profits in the Power Sector," Electricity Policy Research Group Working paper, EPRG 0617, May. 2006.
- [5] D. Chattopadhyay, "Modelling Greenhouse Gas Reduction from the Australian Electricity Sector," *Concept Economics*, Nov. 2008.
- [6] 김양일, 정구형, 한석만, 김발호, "CO2 배출량 제약과 배출권거래제를 고려한 설비계획 방법론 개발에 관한 연구," *전기학회논문지*, 56권 3호, pp.481-490, 2007. 3.
- [7] 김영세, *게임이론*, 박영사, pp.58-65, 2007.
- [8] J. D. Webber 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.
- [9] K. D. Sadi, *Fundamentals of power system economics*, John Wiley & Sons, pp.73-104, 2004.
- [10] N. S. Rau, *Optimization Principles*, John Wiley &

Sons, pp.37-124, 2003.

[11] 전력거래소, CBP시장 경쟁강화를 위한 시장제도 선진화 추진계획, 2009. 3.

저 자 소 개



김 상 훈 (金尙勳)

1982년 9월 3일생. 2007년 단국대 공대 전기전자컴퓨터공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)

Tel : 031-8005-3621

E-mail : hoonsmile@dankook.ac.kr



이 광 호 (李光浩)

1965년 12월 22일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 전력연구원 위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 공대 전자전기공학부 교수.

Tel : 031-8005-3604

E-mail : khlee@dku.edu



김 욱 (金煜)

1968년 2월 11일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 한국남부발전 발전처 과장.

Tel. : 070-7713-8414

Fax : 070-7713-8274

E-mail : dr.wookkim@gmail.com