

## IV. 배출권가격<sup>17)</sup>

### 1. 탄소배출권시장의 가격결정요인

재무학 내지 금융공학에서, 기본적으로 모든 자산의 가격은 위험-조정된 (risk-adjusted) 미래 현금흐름의 기댓값의 현재가치로 정의된다. 그래서 자산 가격결정에 미치는 요인들, 미래의 현금흐름, 시장 참여자들의 기대, 위험에 대한 선호(risk preference), 할인율, 위험-조정방법 등이라고 할 수 있다. 이러한 요인들은 독립된 요인이라기 보다는, 서로 연관되어 있다고 할 수 있다. 예를 들자면, 미래의 현금흐름에 대한 불확실성이 커지면, 시장참여자들의 기대가 변하게 되고, 위험조정관련된 변수가 변하기도 한다.

특히 시장참여자들 자산의 미래현금흐름에 대한 기대(expectation)는 주관적이지만, 일반적으로 합리적이라고 가정된다. 시장참여자의 합리성은 수많은 투자자들이 시장에 참여하지만, 그 시장참여자들의 평균적인 투자자를 대표적인 투자자로 상정하기 때문에 어느 정도 정당화될 수 있다.

많은 요인들이 대표적인 시장참여자의 기대에 영향을 미친다. 이러한 요인들은 기본적으로 탄소배출권의 현금흐름에 영향을 미치는 요인들이다. 경제학에서 언급하고 있는 탄소배출권의 수요 및 공급요인들이 대표적인 예들이다.

#### 가. 탄소배출권 수요 및 공급요인

탄소배출권의 공급측면은 정책적으로 규제되는 탄소배출에 대한 규모이고, 수요 측면은 이산화탄소를 배출하는 기업이 된다. 그리고 장단기 요인으로도 구분해 볼 수 있다. EU-ETS의 배출권가격에 영향을 미치는 단기적 요인으로는 회원국의 NAP(National Allocation Plan) 규모, 연료의 가격, 경제 성장, 기온에 의한 계절적 요인 등이 있다. 그리고 장기적 요인으로는

---

17) 유시용, 중앙대학교 경영대학 부교수(sy61@cau.ac.kr)

지구온난화로 인한 기후변화의 심각성에 대한 인식의 확산, 이를 근거로 하는 정책적 선택, 국제사회의 기후변화협약인 UNFCCC의 결정 등이 있다.

### 1) 공급요인

공급요인 중에서 가장 중요한 요인은 회원국의 NAP이다. 2005년 초, 영국과 폴란드의 NAP 결정처럼 각국의 환경정책 강도 및 국가배출권 배정위원회(NAP)에 따라 탄소배출권의 가격에 영향을 미치게 된다. 회원국들의 국가배출권 배정위원회(NAP)에 따라 국가별로 이산화탄소 감축 규모를 결정하고, 이를 에너지 집중 산업 (철강 산업, 건축재, 펄프 등) 및 전력 산업에 배분하게 된다. 만일 국가할당계획에 따른 이산화탄소 감축 규모가 커지게 된다면, 탄소배출권에 대한 수요 증가가 예상되어 배출권 가격이 상승하게 된다.

그러나 이러한 각국의 계획은 일단 결정이 되고 나면 더 이상 공급에 영향을 미치지 못하게 되므로 장기적인 탄소배출권 가격의 수준을 결정하는 요인으로 작용하지만 단기적인 움직임에는 큰 영향을 주지 못한다. 다만 각국의 탄소배출권 할당의 결정의 과정에 있는 경우에는 각국의 결정이 발표되고 또는 수정되는 과정에서 배출권 가격의 큰 영향을 주게 된다.

다음으로 공급측면에서 탄소배출권 가격에 영향을 주는 것은 바로 CDM, JI 등의 사업을 통한 탄소배출권의 발행이다. CDM, JI는 EU-ETS에 새로운 탄소배출권을 공급해 주는 역할을 하기 때문에 가격에 변화를 주는 것이다. 만약에 CDM 사업 등이 활성화될 경우 EU-ETS 시장에 배출권의 공급이 확대되면서 배출권 가격이 하락하게 될 것이다.

이외에도 제도적인 측면의 변화에 따른 공급량의 변화가 발생할 수 있다. 만약에 현재에 확보된 배출권을 계속적으로 미래(교토의정서 상 1차 감축의 무기간 후)로 이월(banking)할 수 있다고 제도가 변경되고 미래에 가격이 현재보다 높아진다는 기대가 형성될 경우 현재에 배출권의 공급이 감소하면서 탄소배출권의 가격이 상승할 수 있다.

## 2) 수요요인

수요의 변화는 수요자의 전략 결정에 의한 것으로 탄소배출권의 주요 수요자인 전력회사의 전략변화가 주요한 변수로 작용할 것이다. 우선 전력회사의 전략은 단기적으로 사용연료를 어떤 것을 사용하느냐에 집중되고 장기적으로는 전력생산 시설을 변환시키는 것을 고려하는 것이다. 단기적인 측면에서 볼 때, 전력회사는 탄소배출을 많이 하는 고탄소배출 연료(대표적으로 석탄)와 청정연료(대표적으로 천연가스)를 사용하였을 때 비용이 어느 것이 큰가를 가지고 생산을 결정하게 된다.

이외에도 강수량, 풍량 등의 변화도 탄소배출권 가격에 영향을 주게 되는데, 강수량과 풍량이 풍부할 경우 재생에너지 생산비용을 감소시켜 재생에너지를 통한 발전량의 비중이 확대되며 탄소배출권의 수요가 감소되고 따라서 배출권의 가격이 하락하게 된다.

다음으로 전력가격의 변화이다. 전력가격의 변화는 전력회사의 수익성을 변화시켜 배출권에 대한 수요에 영향을 주게 된다. 전력가격이 상승할 경우 회사의 수익성이 상승하면서 상대적으로 연료비용이 높은 청정에너지의 사용이 증가하는 효과를 유발하여 탄소배출권의 가격을 하락시키는 결과를 가져오게 된다. 이는 수익성이 확보되면서 규제대상인 석탄 등 고탄소배출 연료보다는 청정에너지를 사용하는 것이 장기적으로 자신에게 유리하다고 판단하여 청정에너지의 사용 유인이 기업에게 발생하기 때문이다.

그리고 전반적인 경제성장이 수요요인의 주요한 변수가 된다. 탄소배출은 대부분 에너지소비에서 비롯된 산업경제활동과 밀접한 관련을 맺고 있어 경제성장률을 포함한 거시경제 지표가 배출권의 가격 형성에 영향을 미칠 수 있다. 산업생산 및 경제 성장률이 증가하면, 에너지 소비 증가를 수반한 배출권 수요 증가가 예상되고 배출권의 가격은 상승하게 된다.

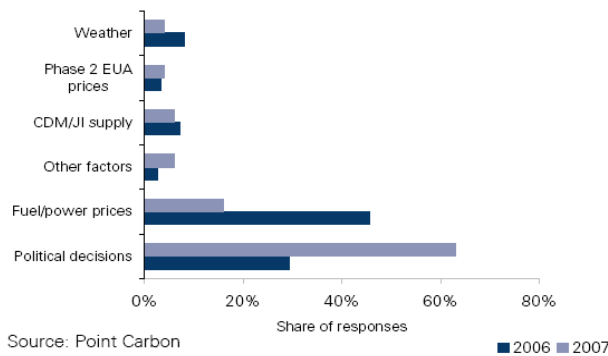
계절 및 기후적 요인도 에너지사용에 영향을 미침으로 탄소배출권의 수요요인으로 작용한다. 계절적 변동으로 전력 수요가 달라지고, 기상 및 기후조건에 따라 에너지 소비가 달라져 배출권 가격에 영향을 미친다. 동절기 한파나 하절기 무더위에는 에너지 소비 증가로 유가가 상승하고 유연탄 발

전에 의한 전력 수요가 증가되어 배출권의 구매가 증가하게 된다.

원유와 천연가스 등 대체연료의 상대가격 또한 배출권 가격에 영향을 미친다. 유가가 상승하게 되면, 저렴한 대체연료인 유연탄의 소비를 선호하게 되고, 이는 배출량 증가를 초래하여 배출권에 대한 수요가 더 증가하게 된다. 고탄소배출 연료를 사용하고 그것에서 발생하는 탄소배출을 탄소배출권을 구입하여 충당하는 것이 청정연료를 사용하는 비용보다 낮을 경우에는 탄소배출권의 수요가 증가하여 배출권의 가격이 상승할 것이고 청정연료를 사용하는 것이 더 유리할 경우에는 탄소배출권의 수요가 감소하여 가격이 하락하게 되는 것이다. 따라서 석탄가격과 천연가스 가격의 차가 상승할 경우에는 탄소배출권의 가격이 하락하게 되고, 역의 경우에는 탄소배출권의 가격이 상승하게 될 것이다. 석탄가격과 천연가스 각각의 가격변동도 탄소배출권 가격에 영향을 주나 결정적인 것은 이들 가격의 차에 의해서 결정될 것으로 보인다. 석유가격의 경우에는 천연가스 가격과 같은 방향으로 움직이는 경향이 있어 천연가스와 같은 방향으로 탄소배출권 가격에 영향을 주게 된다.

그리고 기업의 자체적인 저감노력이나 저감기술개발은 장·단기적으로 탄소배출권에 대한 수요를 감소시키는 요인으로 작용한다.

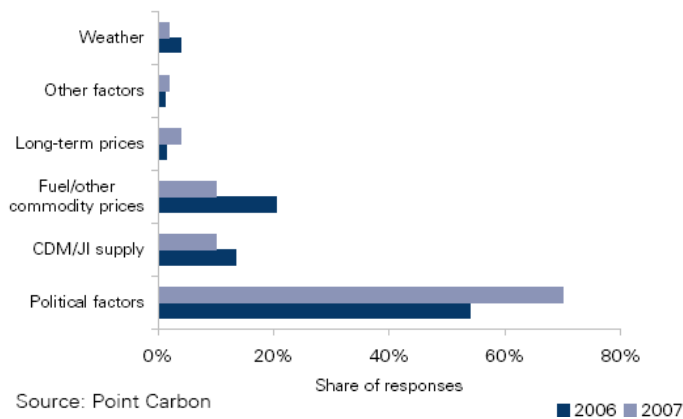
<그림 IV-1> 단기적인 배출권 가격 결정요인



자료 : Point Carbon, A new climate for carbon trading, Web survey, 2007.3.13, 김영경(2007) 재인용

Point Carbon에서 실시한, 장·단기적으로 배출권가격에 영향을 미치는 요인을 설문조사한 결과, 정치적인 요인이 가격에 결정적으로 영향을 미칠 것이라 기대하고 있는 것으로 나타났다.<sup>18)</sup> 이는 배출량의 감축규모와 배출권의 공급량 등이 정책적으로 결정되기 때문이다. 그래서 이번 UNFCCC 제15차 당사국총회(COP15)는 개도국과 선진국이 함께 참여해서 탄소배출관련 정책을 결정하기 때문에, 향후 탄소배출권 시장의 성장과 변화에 매우 중요한 모멘텀을 제공할 것으로 예상된다.

<그림 IV-2> 장기적인 배출권 가격 결정요인



자료 : Point Carbon, A new climate for carbon trading, Web survey, 2007.3.13, 김영경(2007) 재인용

18) 배출권 거래 및 컨설팅을 하는 해외전문기관들은 2012년까지 약 37억5천만톤의 이산화탄소 배출권이 부족할 것으로 추정하고 있다. 하지만, 배출권 공급부족에 대한 추정은 추정 시점과 추정한 주체에 따라 많은 차이가 있으며, 최근 급격하게 증가하고 있는 CDM, JI 사업 등을 감안할 때 신중한 추정이 바람직하다.

## 나. 배출권가격 수준에 대한 예상

배출권 가격은 배출권이 기본적으로 복잡하게 디자인되었기 때문에, 가격 책정이 쉽지 않으며, 시장과 전 세계의 환경관련 정책의 다양한 요인들의 불확실성을 반영하기 때문에 가격 전망이 상대적으로 어렵다. 예를 들자면, 배출권과 관련된 상당수 전문가들은 교토의정서의 1차 의무공약 기간인 2012년에 가까워질수록 거래가격은 상승할 것으로 예상하였다. 또한, 아직 시장에 나타나지 않은 배출권 수요가 점차적으로 증대함에 따라 가격 상승 요인으로 작용할 수 있을 것으로 내다보기도 했다. 하지만 전 세계적인 경기침체로 인해 세계적인 산업생산량이 감소하면서, 자연적으로 탄소배출량이 감소하게 됨에 따라 탄소배출권에 대한 수요가 감소하고 있는 것이다. 그리고 2009년 덴마크 코펜하겐에서 있을 UNFCCC의 제15차 당사국총회(COP15)의 정책적 결정도 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 탄소배출권 가격의 향방을 예측하기는 쉽지 않다.

시장참가자들을 대상으로 한 기존의 설문조사에서는 2008~2012년 기간 동안의 배출권 가격에 대해서는 가격이 상승될 것이라고 하는 시장 컨센서스(consensus)가 확인된다. 미래의 배출권 가격이 상승할 것이라고 하는 전망은 IETA, Point Carbon 등 배출권 시장의 전문기관들이 실시한 시장참여자에 대한 설문조사 응답을 통해 확인되었다. 비록 전 세계적인 경기침체가 새로운 요인으로 작용하고 있지만, 기후변화대응과 관련한 탄소배출감축에 대해서는 전 세계적 공감대가 형성되어 있고, 장기적으로 탄소배출감축이 정책적으로 실시될 가능성이 크다고 할 수 있다. 이러한 시장전망과 기대는 장기적으로 탄소배출권의 가격이 상승할 것이라는 것을 뒷받침하고 있는 것이다.

## 다. EU-ETS 배출권 가격 추이

아래의 그래프는 EU-ETS의 1단계 탄소배출권(EUA05-07)의 일별 종가 추이를 나타내고 있다. EU-ETS시장은 2005년 1월1일부터 개시되었지만, 자료는 2005년 6월 24일부터 2007년 12월 28일까지의 종가이다. 본 자료에는

나타나지는 않았지만, EU-ETS의 탄소배출권의 현물가격은 2005년 1월에는 약 7유로에서 출발하여서 2006년 4월 중에는 약 30유로까지 상승하였다. 1 단계기간의 별금수준이 단위톤당 40유로였음을 고려할 때, 높은 수준이라고 할 수 있다. 기본적으로 배출권가격이 상승하는 이유는 만기에 배출량이 증가하여 배출권의 수요가 증가할 것이라고 예상하기 때문이다. 그래서 2005년 7월초까지 배출권가격이 꾸준히 상승하여 30유로에 근접하게 상승했는데, 이는 국가배출권 배정위원회(NAP)의 삭감으로 인해서 시장참여자들이 만기에 배출권이 부족할 것이라고 예상했기 때문이었다.

2006년 4월의 탄소배출권 가격의 급격한 하락한 이유는 1차 배출검증보고서의 발표시점에서 시장참여자들이 배출권에 대한 과도한 매도포지션을 취했다는 기대가 형성되었기 때문이었다. 즉, 온실가스 배출량을 조사 결과, 기대 이하로 온실가스를 배출한 것으로 나타나서, 배출권 수요가 감소할 것이라는 기대가 형성되었던 것이다. 이는 탄소배출권 가격이 만기시점에서 탄소배출권을 과다보유하게 될 것인가 혹은 과소보유하게 될 것인가에 대한 기대에 민감하게 반응한다는 것을 보여주고 있다.

<그림 IV-3> EU-ETS 탄소배출권(EUA05-07) 일별 증가 추이  
(단위: 유로)



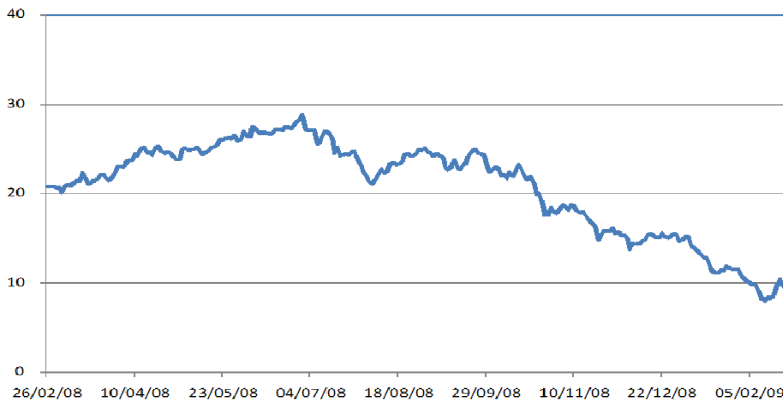
주 : 기간은 2005년 06월 24일부터 2007년 12월 28일 까지다.  
자료 : <http://www.bluenext.fr>

2006년 4월의 급락 이후 2006년 9월까지 대략 17유로 정도에서 등락을 거듭하고 있다. 2006년 10월 이후, 탄소배출권가격은 지속적으로 감소하여 2007년 7월부터는 거의 영(0)을 기록하고 있다. 즉, 이때부터는 시장참여자들이 모두 온실가스 배출량에 비해서 배출권을 충분히 확보하고 있다는 기대가 형성되었기 때문에, 배출권의 가격은 0을 기록하고 있는 것이다.

아래 그림은 2단계 탄소배출권(EUA08-12)의 일별 종가를 나타내고 있다. 2단계기간의 벌금수준은 단위톤당 100유로이다. 초기에는 20유로에서 출발하여 2008년 6월까지 어느 정도 상승하다가 하락하는 추세를 보이고 있다. 이는 2008년 중반이후 전 세계적인 경기침체로 산업생산이 감소하게 될 것을 예상하여, 탄소배출권의 수요가 감소할 것으로 예측하고 있기 때문인 것이다.

<그림 IV-4> EU-ETS 탄소배출권(EUA08-12) 일별 종가 추이

(단위: 유로)



주 : 기간은 2008년 2월 26일부터 2009년 2월 24일 까지다.  
 자료 : <http://www.bluenext.fr>

만약 전 세계적인 경기침체가 지속되어, 산업생의 감소로 인해서 탄소배출권에 대한 초과공급이 발생할 것으로 예상된다면, 배출권 가격은 지속적으로 하락하여 0으로 수렴할 것이다. 만약 2단계 기간(2008~2012년) 중에 경기회복



이 예상되고 산업생산 증가로 탄소배출권에 대한 초과수요가 발생할 것으로 예상된다면, 배출권가격은 벌금수준인 100유로로 수렴하게 될 것이다.

가격수익률의 통계적 특성을 각 단계별로 비교해보고자 한다. 배출권가격 수익률( $100 \times \ln(S_t/S_{t-1})$ )의 비교 시, 수익률 왜곡을 완화시키기 위해, 1단계기간의 경우 자료는 배출권가격이 단위당 5유로 이상의 경우만 고려하여, 2005년 6월 24일부터 2007년 1월 22일까지의 자료를 사용하였다.

<표 IV-1> EU-ETS의 배출권가격 일별 수익률의 기간별 비교

(단위: %)

	1단계기간 수익률	2단계기간 수익률
평균	-0.23	-0.33
분산	4.81	2.81
왜도	-1.99	-0.26
첨도	27.46	2.02
관측수	336	254

먼저 수익률의 변동성을 살펴보면, 2단계기간 동안의 변동성이 1단계기간 보다는 작은 편이다. 이는 정책적 불확실성이 완화됨에 따라서 향후 배출량과 관련된 불확실성이 완화되었기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 1단계기간의 배출권가격의 수익률의 첨도는 3보다 커서 급첨(leptokurtic)의 특성을 보인 반면, 2단계기간의 배출권가격 수익률의 첨도는 3보다 작은 완첨(platykurtic)의 특성을 보이고 있다. 왜도역시 1단계기간 동안의 수익률이 왼쪽으로 더 큰 꼬리를 가지고 있다고 할 수 있다. 결론적으로 2단계기간의 배출권가격의 수익률이 1단계의 수익률에 비해서 상대적으로 안정적인 모습을 보이고 있다고 할 수 있다. 이는 EU-ETS가 정책적인 불확실성이 어느 정도 해소되고 있고, 제도적으로 안정되어감에 따라 EU-ETS 시장 내의 배출량 관련 예측가능성 향상되어가고 있기 때문이다.

## 2. 탄소배출권가격 모형

### 가. 서론

탄소배출권은 시장기반 환경정책의 일환이라 할 수 있다. 시장기반 환경정책은 생산과정에서의 외부효과를 내부화시키는 정책이라고 할 수 있다 (Pigou, 1918). 일반적으로 환경목표를 달성하는 정책은 크게 직접규제와 시장 메커니즘을 이용한 인센티브 제도로 나누어 볼 수 있다. 직접규제로는 배출 총량규제와 기술규제를 꼽을 수 있으며, 인센티브제도로는 배출권거래제 및 환경세 등을 들 수 있다. 그리고 배출권거래제는 초기 배출권을 할당하는 방법에 따라 다시 여러 가지로 구분된다. 배출권은 경매를 통해 유상으로 분배될 수도 있으며, 특정 기분을 가지고 무상으로 분배할 수도 있다 (유승직, 2004).

배출권거래제는 기존의 강제규제 정책에 비해서 비용-효율적일 뿐 아니라, 분명한 시장신호를 기업에게 전달함으로 효율성을 제고하게 된다. 시장기반환경정책은 Coase(1960)나 Dales(1968) 등의 연구에 기반을 두고 있다. 이러한 접근은 오염저감(pollution abatement)문제를 재산권개념을 도입해서 비용-편익 틀 안에서 다루고 있는데, 기본적인 배출권거래에 대한 소개하고 있다.

환경경제학에서 단순한 모형 설정 하에서 배출권의 균형가격은 최저의 오염저감 한계비용과 같은 점에서 결정된다. 만약 배출권 가격이 높으면, 상대적으로 오염저감 한계비용이 낮은 기업은 이 기술을 채택하여 가격차를 활용하여 초과이윤을 누릴 수 있게 된다. 즉, 배출저감 기술을 채택하여 오염배출을 규제 수준 이하로 줄여서, 추가적으로 배출권 판매를 통해서 초과수익을 올리게 되는 것이다.

Tietenberg(1985)와 Cronshaw and Kruse(1993) 등은 이산시간(discrete time)에서 배출권거래 모형을 제시했으며, Rubin(1996)은 최적컨트롤(optimal control)이론을 적용하여 연속시간(continuous time)에서 모형을 전개하였다. 배출권을 빌리거나 예탁(banking)이 가능한 상황에서는 한계저감

비용의 할인가치는 이론적으로 상수로서 시간에 대해서 불변이다. 그래서 균형에서 배출권가격은 무위험 이자율로 성장하게 된다.

Schennach(2000)은 Rubin(1996)의 모형에서 불확실성을 도입하였다. 이것으로 인해서 배출권가격의 기대성장률은 감소하게 된다. 이 모형에서는 확률적, 연속시간, 무한시간 등의 가정 하에서 배출권 가격을 암묵적으로 분석하고 있다. 이러한 모형 설정 하에서, 오염저감 균형수준은 한계저감비용과 배출권 현물가격이 같은 수준에서 결정된다. 그러나 이렇게 도출된 이론가격과 실제적으로 관찰되는 배출권의 시장가격과는 많은 괴리가 존재한다.

Daskalakis et al.(2007)은 유럽탄소배출권 선물가격을 설명하기 위해서 확산모형과 점프-확산 모형을 도입하였다. Benz and Trück(2006)은 마야코프-전환(Markov switching)모형을 도입하여 탄소배출권 현물가격의 움직임과 현물가격 수익률의 이분산성을 설명하였다. 이와는 대조적으로, Paolella and Taschini(2008)는 GARCH류의 모형을 도입하여 미국의 SO<sub>2</sub> 배출권 가격 수익률과 EU-ETS의 탄소배출권 가격 수익률의 이분산성을 설명하였다.

Seifert et al.(2006)과 Fehr and Hinz(2006)은 동적 가격책정 모형을 활용하여 EU-ETS의 배출권 가격을 도출하였다. Seifert et al.(2006)는 배출 수준을 낮추려는데 투자를 할 것인가를 고려하고 있는 하나의 기업을 고려하였다. 그 경제주체는 기대되는 총배출량에 크게 의존하여 자신의 최적 저감량을 결정한다. Fehr and Hinz(2006)는 오염저감량 측정을 장단기로 구분하였으며, 단기적으로 사용하는 연료를 전환할 수 있는 선택권이 있는 상태에서 최적 저감량을 결정해야하는 n개의 기업을 고려하였다.

대부분의 오염 저감기술은 내구적이며 비가역적인 투자인 반면 배출권은 기업에게 오염저감방법에 관한 엄청난 유연성을 제공한다(Chao and Wilson, 1993). 따라서 단기적인 저감량 선택도 기술적인 제약이라기보다는 시장에 기초한 기업의 선택의 문제인 것이다. Chesney and Taschini(2008)에서는 기업의 오염배출량은 외생적으로 주어진다고 가정한다. 기업은 비용함수를 최소화하기 위해서 배출권을 매매하여 최적 배출권 포트폴리오 배분을 연속적으로 조절한다고 가정한다. 이러한 가정 하에서 Chesney and Taschini(2008)는 배출권 가격이 해당 기업의 순수적오염 과정에 결정적

로 의존한다는 것을 보였다.

배출권 가격책정에서 배출권의 미래 현물가격으로부터 파생되는 모든 가능한 수익을 고려해야 할 것이다. 예를 들면, 프로젝트기반 투자의 경우, 이를 통해 획득가능한 배출권 판매를 통한 수익도 가격책정에 반영되어야 할 것이다.<sup>19)</sup> 또 다른 예로서, 저감기술 적용이나 생산과정 변경 등으로 배출권 구입비용 절감이나 잉여의 배출권 판매를 통한 수익 등의 가능성도 가격책정에 반영되어야 할 것이다.

## 나. 단기의 저감기회

각 기업은 배출권을 거래하거나, 저감기술을 적용하여 배출량을 줄이는 선택을 할 수 있다. 배출 저감기술은 크게 세 가지 부류가 있다. 첫째는 생산량 감축을 통한 탄소 배출저감 방법이다. 둘째는 생산과정이나 연료전환(fuel switching)을 통한 탄소배출 저감 방법이다. 마지막으로 최종단계 정화설비를 설치하는 방법이다. 배출량 감소를 위해서 생산량을 줄이는 첫 번째 저감방법의 경우 이례적인 경우에만 적용될 것이다.

EU-ETS 중에서 상대적으로 작은 규모의 배출허가량을 받으면서, 가장 크게 영향을 받은 기업은 연료 연소를 통해 전기를 생산하는 발전업체인데, 발전업체는 연료전환을 통해서 가장 비용효율적으로 배출량 감축을 달성할 수 있다.<sup>20)</sup> 하지만 현 단계에서 이러한 연료전환 방법은 잘 사용되지 않는다. 그 이유 중의 하나는 발전업체가 연료구매를 장기로 계약해서 연료전환 의사결정이 쉽지 않다는 것이다(Insley, 2003). 하지만 좀 더 설득력있는 설명으로는 발전업체의 경우 연료전환을 발생시킬 만큼의 충분한 연료가격

19) 교토의정서는 유연성체계(flexible mechanism)인데, 공동이행제도(JI)를 통해서 배출감축단위(ERU: Emission Reduction Unit)를 이전하거나 취득할 수 있으며, 청정개발체계(CDM: Clean Development Mechanism)를 통해서 선진국이 개도국의 온실가스 감축 혹은 제거 프로젝트에 투자하여 인증된 배출 감축량(CERs: Certified Emission Reductions)을 획득할 수 있다.

20) 연료전환의 예를 들면, 고탄소(고유황) 연료를 저탄소(저유황) 연료로 대체하여 사용하는 것이다. 미국의 발전업체에서 가장 일반적인 경우는 고유황 석탄을 저유황석탄으로 전환하여 사용하는 것이며, 유럽의 경우에는 석탄 대신에 천연가스를 사용하는 것이다.

간의 차이가 발생하면, 연료를 전환하게 되지만, 실제 탄소 가격/비용 비율은 일별 연료전환을 촉발시킬 만큼 충분하지 않다는 것이다. 이러한 현상을 고려했을 때, 시간을 단기로 상정해도 무방할 것이다.

저감기술과 배출권을 모형에서 동시에 고려하는 경우, 대부분 완전대체재로 간주하고 있다. 하지만 저감기술을 위한 투자는 비가역적(irreversible)이며, 생산량 변화에 따라 최적으로 사용되기가 쉽지 않다. 하지만 배출권의 경우 시장여건에 따라 조절가능하기 때문에 좀 더 효율적이며 유연하다. 따라서 저감기술은 배출권에 비해서 불확실성이 높고 비효율적이라고 할 수 있다(Chao and Wilson, 1993).

## 다. 하나의 기업의 경우

거래가능한 배출권 가격을 모형화하는 데 있어서는 효율적 시장을 가정한다(Montgomery, 1972). 이 경우 균형은 각 온실가스배출 기업의 온실가스저감의 한계비용이 같아지는 점에서 이루어진다. 이 경우, 모형상 가정은 다수의 온실가스배출 기업은 하나의 대표기업으로 묘사되며(Seifert et al., 2006), 중앙집권기구(central planner)의 자원배분 결과와 일치하게 된다(Fehr and Hinz, 2006).

여기서는 하나의 대표기업을 상정하여, 유한기간  $T$  동안 배출권 가격과정을 도출하고자 한다.<sup>21)</sup> 또한 비용최소화 문제를 푸는 과정에서 균형배출권 가격을 도출해보고자 한다.

$(\Omega, F, P)$ 를 확률공간이라 하자.  $Q_0$ 를 초기 온실가스배출 수준,  $X_0$ 를 초기 시점 0에서 사거나( $X_0 > 0$ ) 파는( $X_0 < 0$ ) 배출권 양,  $N$ 은 배출할 수 있는 초기 부존량이라고 하자. 초기 시점  $t=0$ 의 기업의 순 배출권량은 다음과 같다.

$$\delta_0 = N + X_0$$

21) 모형의 단순화를 위해서, JI나 CDM 프로젝트에 의해서 발생된 배출권 거래 가능성에 대해서는 향후 연구과제로 남긴다.

$\delta_0$  는 기업이 온실가스를 배출할 수 있는 양을 나타낸다.

기업은 유한기간  $[0, T]$  구간에 걸쳐, 연속적으로 온실가스를 배출한다고 가정한다. 온실가스배출은 외생적으로 주어진 기하브라운운동(geometric Brown motion)을 따른다고 가정한다.

$$\frac{dQ_t}{Q_t} = \mu dt + \sigma dW_t,$$

혹은,

$$Q_t = Q_0 \exp \left[ \left( \mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) t + \sigma W_t \right].$$

여기서,  $\mu$  는 표류항,  $\sigma$  는 변동성,  $W_t$  는 통상적인 브라운 운동(Brown motion)과정을 나타낸다.  $Q_0$  는 통상의 생산과정에서 발생하는 온실가스배출수준이라고 할 수 있다. 초기 시점 0에서부터 시점  $t$ 까지의 누적배출량은 다음과 같다.

$$\int_0^t Q_s ds$$

기업이 합법적으로 온실가스를 배출하려면, 최종시점  $T$ 까지 충분한 배출권이 있어야 한다. 만약 배출량이 배출권을 초과하게 되면, 기업을 배출 단위당  $P$ 만큼의 벌금을 지불해야 한다.<sup>22)</sup> 최종 시점  $T$ 기 말에, 승인된 배출수준과 발행된 배출권 수준이 같을 수도 있고 아닐 수도 있다. 즉, 말기에 기업은 온실가스배출량보다 보유하고 있는 배출권 수준이 커서, 가치없는 배출권을 보유하고 있든지, 보유 배출권 이상으로 온실가스를 배출하여 초

22) EU-ETS의 벌금은 매년 말에 부과되고 있다. 하지만 European Directive에서는 거래기간 동안에 1년 기간을 연장해 빌리는 것을 허용하고 있다. 즉, 기업은 현재 시점의 배출권을 구입하는 대신에, 1년 미래의 배출권을 1년 앞당겨 사용할 수 있다는 것이다. 따라서 거래기간 동안 배출권 부족으로 벌금을 지불하지 않아도 된다는 가정은 무리한 가정이라고 할 수 없다.

과분에 대해 단위당 벌금  $P$ 를 지불하거나, 배출량과 보유 배출권이 같아지도록 할 것이다. 실제적으로 대부분의 경우, 최종 현금흐름은 이진결과(binary outcome)로 나타나게 된다. 관망(wait-and-see) 상황에서,  $[0, T]$  기간 동안 배출권거래가 없는 경우를 상정하면, 기업의 최종 비용은 다음과 같다.

$$f\left(T, \int_0^T Q_s ds, \delta_0, P\right) = \max\left\{0, \int_0^T Q_s ds - \delta_0\right\} \cdot P,$$

여기서,  $\int_0^T Q_s ds$ 는 기업의 최종 누적 배출량을 나타낸다.

초기 배출부존량, 미래 배출권의 순 포지션에 대한 기댓값이 주어진 상황에서, 기업은 초기 시점에서 비용을 최소화한다고 가정한다. 기업의 총비용은 초기의 현금흐름과 최종시점 말의 잠재적 벌금비용의 합이다.<sup>23)</sup> 기업의 비용최소화 문제는 다음과 같다:

$$\min_{X_0} \left\{ S_0 \cdot X_0 + e^{-\eta T} E_P \left[ \left( \int_0^T Q_s ds - \delta_0 \right)^+ \cdot P \mid F_0 \right] \right\}$$

기댓값은 역사적 확률측도 하에서 계산되어지며,  $\eta$ 는 할인율 혹은 가중 평균 자본비용(weighted average cost of capital),  $S_0$ 는 초기시점의 배출권 가격을 나타낸다.

기업의 비용최소화라는 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Geman and Yor, 1993).

$$\begin{aligned} H &\equiv \left\{ S_0 \cdot X_0 + e^{-\eta T} E_P \left[ \left( \int_0^T Q_s ds - \delta_0 \right)^+ \cdot P \right] \right\} \\ &= \left\{ S_0 \cdot X_0 + e^{-\eta T} E_P \left[ \left( \frac{4}{\sigma^2} Q_0 A_{\sigma^2 T/4} - N - X_0 \right)^+ \cdot P \right] \right\}, \end{aligned}$$

23) 배출권 판매를 통해서 수입이 발생한다면, 이 금액만큼 제하면 된다.

여기서,

$$\int_0^T Q_s ds = \frac{4}{\sigma^2} Q_0 \int_0^T e^{2(\widetilde{W}_u + zu)} du = \frac{4}{\sigma^2} Q_0 A_{\sigma^2 T/4}^z,$$

$$z := \frac{2\nu}{\sigma}, \nu := \frac{1}{\sigma} \left( \mu - \frac{\sigma^2}{2} \right), \widetilde{W}_u := \frac{\sigma}{2} W_{4u/\sigma^2}, A_T^\nu = \int_0^T e^{2(W_s + \nu s)} ds.$$

위의 비용최소화의 1계 필요조건은 다음과 같다(부록 A 참조).

$$S_0 = e^{-\eta T} \cdot P \cdot \int_{\delta_0 \cdot \sigma^2/4 Q_0}^{\infty} \Pr[A_{\sigma^2 T/4}^z \in dx].$$

위의 1계조건에 의하면 배출권의 현물가격은 벌금과 배출권 부족 상황에 대한 확률의 함수임을 알 수 있다.

이산시점에서 배출권 현물가격을 계산해보면 다음과 같다(부록 A 참조).

$$S_0 = e^{-\eta T} [P \cdot \Phi(\underline{d})],$$

여기서,

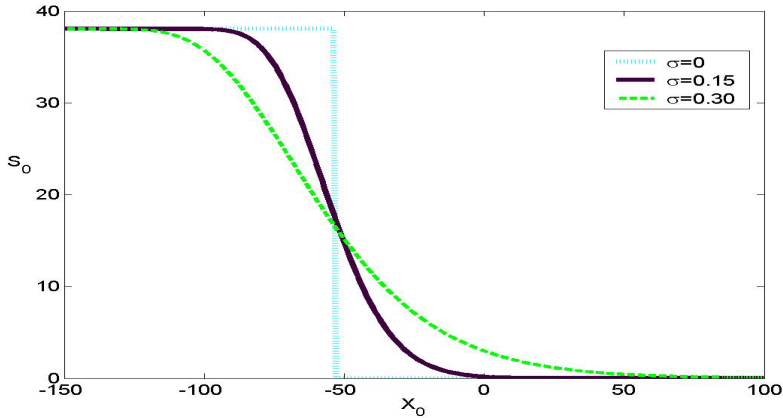
$$\underline{d} = \frac{\ln(Q_0 \Delta t / \delta_0) + (\mu - \sigma^2/2) \Delta t}{\sigma \sqrt{\Delta t}}, \Delta t = T.$$

$\Phi(x)$ 는 확률변수  $x$ 의 누적표준정규분포의 값을 나타낸다. 배출권의 현물가격은 조건부 증권의 수익(contingent claim payoff) 혹은 미래 기대 비용의 할인값으로 결정됨을 의미한다.

온실가스배출과정과 기타 파라미터들이 주어진 상황에서, 배출권가격과 배출권구매량 간의 관계를 수치해석적으로 살펴보기로 하자.



<그림 IV-5> 온실가스배출의 변동성변화에 따른 배출권가격과 구매량  
(하나의 기업이 존재하는 경우)



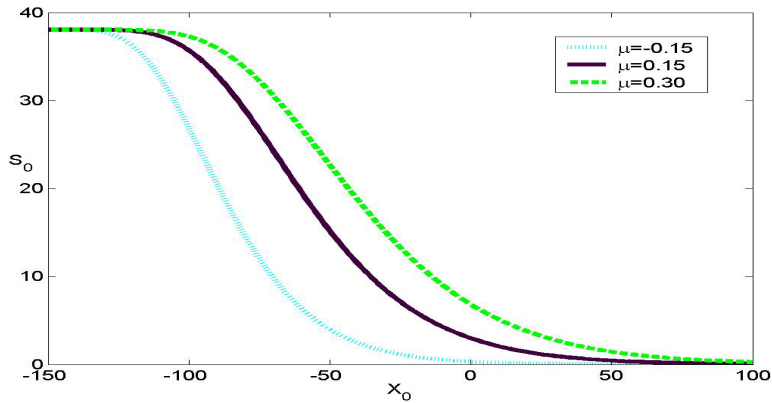
주 :  $N=170, P=40, Q_0=100, \eta=0.05, \mu=0.15$ .

위 그림은,  $N=170, P=40, Q_0=100, \eta=0.05, \mu=0.15$  등으로 값들이 주어진 상황 하에서, 변동성이 변할 때, 배출권가격과 배출권구매량 간의 관계를 나타내고 있다. 먼저 수직선의 경우, 변동성이 영( $\sigma=0$ )인 경우의 배출권가격을 기업의 초기시점에서의 배출권 거래량( $X_0$ )의 함수로 나타낸 것이다. 이것은 기업이 최종적으로 배출하게 되는 배출량에 대한 불확실성이 없는 경우와 마찬가지로이다. 이 특별한 경우, 기업의 53단위 이하의 배출권을 초기에 판매하게 되면, 확실히 배출권 잉여 상황에 직면하게 된다. 결과적으로 기업은 배출량에 비해서 충분한 배출권을 보유하고 있기 때문에, 벌금을 내지 않게 된다. 또한 배출권의 가격은 영(0)이 된다. 반대로 만약에 기업이 초기에 53단위 초과 배출권을 판매하게 되면, 배출권 부족 상황에 직면하게 된다. 따라서 허가량 이상의 배출량에 대해서 벌금을 지불하게 된다. 이 경우 배출권은 가치를 지닌다. 배출권 단위당 가치는 벌금의 위험조정 현재 가치( $S_0 = 38$ )와 같다. 불확실성이 없는 경우, 즉, 변동성이 0인 경우, 이론적으로 배출권 초기 거래량에 대한 문턱점을 구할 수 있다. 즉, 이 문턱점

왼쪽으로는 배출권의 가격이  $e^{-\eta T} \cdot P = 38$ 이며, 오른쪽으로는 배출권의 가격이 0이다.

배출량에 대한 불확실성이 존재하는 경우, 즉 변동성이 영이 아닌 경우에는 배출권의 가격은 영(0)과 할인된 벌금 사이에 존재하게 된다. 즉,  $S_0 \in [0, e^{-\eta T} \cdot P]$ 이다. 그리고 누적 배출량과 허가된 배출량과의 차이는 확률적으로 배출권 잉여 혹은 부족 상황을 결정하게 된다. 이러한 확률분포에 따라서 배출권 가격이 결정되는 것이다.

<그림 IV-6> 온실가스배출의 표류향변화에 따른 배출권가격과 구매량 (하나의 기업이 존재하는 경우)



주 :  $N=170, P=40, Q_0=100, \eta=0.05, \sigma=0.15$ .

위 그림은,  $N=170, P=40, Q_0=100, \eta=0.05, \sigma=0.15$  등의 값이 주어진 조건 하에서, 표류향의 값이 변할 때, 배출권가격과 배출권구매량 간의 관계를 나타낸 것이다. 즉, 온실가스배출에 관한 변동성이  $\sigma=0.15$ 로 주어진 상황에서, 표류향이 변할 때 배출권가격과 배출권구매량 간의 관계를 보여주고 있다. 온실가스배출의 표류향이 증가한다는 것은 평균적으로 더 많은 온실가스를 배출하는 것을 의미하며, 이는 초기 배출권 구매량에 대한 수요를 증가시켜, 배출권가격의 상승을 초래하게 된다.

## 라. 두 개 기업 및 다기간 거래

위의 모형은 단순한 모형이었지만, 실제 배출권거래 시장에는 많은 수의 기업들이 존재한다. 그래서 많은 수의 기업이 포함된 경우의 최적화문제가 좀 더 현실적이라고 할 수 있다. 이 경우 다른 기업의 최적화문제를 고려해서 본 기업의 최적화문제를 풀게 된다. 단순모형에 비해서, 몇 가지 기술적, 상업적, 영업요인들로 인해서 온실가스 배출수준과 배출권수요에 대한 불확실성이 또한 증가하게 된다. 불확실성의 증가는 배출권수요의 초과수요 혹은 초과공급 상태를 초래할 가능성을 높인다. 두 경우 모두 사회적 비용을 초래하게 된다. 배출권 초과수요의 경우, 초과 온실가스배출에 대한 벌금의 부과로 인한 비용이 발생하게 된다. 배출권 초과공급 시 정(+)의 가격으로 구입한 행사하지 못한 배출권의 가치는 영(0)이 되어 보유한 잉여 배출권의 가치는 없어진다. 그래서 모든 기업들은 그들의 일종의 배출권 외상계정(credit accounts)을 해소하기 위해서 시장에 참여하여 배출권을 거래한다고 가정한다. 인증일(certification date) 때문에 각 기업이 일정기간동안 배출한 배출량을 보고해야하는 시점(compliance date) 직후, 이러한 배출권 외상계정(credit accounts)을 거래한다고 가정한다. 그러나 이러한 가정은 현물가격의 동학을 간과하게 된다. 사실 과거 배출권가격 데이터는 대부분의 해당 기업들이 규정준수(compliance)를 위해서 자신의 배출권에 대한 포지션을 동적으로 제조정한다는 것을 보여주고 있다. 한편으로 어떤 기업들은 배출권과 미래의 순배출(net emission) 예측치와의 차이만큼의 배출권을 지속적으로 구입하거나 판매한다. 다른 한편으로는 어떤 시장참여자들은 적극적인 투자전략을 사용하여, 배출권가격이 낮을 때 구입하고 배출권 가격이 비쌀 때 판매하여 투기적 수익을 추구하기도 한다.<sup>24)</sup>

기본모형을 확장하여, 두 기업이 존재하는 다기간모형을 소개하기로 한다. 통상의 확률공간( $\Omega, F, P$ )을 상정하자. 각 기업은 다음의 확률과정에 따라서 연속적으로 온실가스를 배출한다고 가정하자.

24) 정부, 금융기관, 제조업체나 에너지회사, NGO 등이 EU-ETS 배출권시장의 참여자들이다.

$$\frac{dQ_{i,t}}{Q_{i,t}} = \mu_i dt + \sigma_i dW_{i,t},$$

여기서,  $i = 1, 2$ 는 기업을 나타내며,  $dW_{i,t}$ 는 통상의 브라우니안운동(Browinian motion)을 나타낸다.  $X_{i,t}$ 와  $N_{i,0}$ 는 기업  $i$ 의 배출권거래량과 초기 배출권 부존량을 각각 나타낸다. 여기서  $dW_{1,t} \cdot dW_{2,t} = 0$ 이 성립한다고 가정한다. EU-ETS에서와 같이, 탄소 배출상한제(cap-and-trade system) 하에서, 온실가스 감축목표는 각 시기의 초기에 정해지기 때문에, 온실가스 배출권의 공급은 고정된다

$$N = N_{1,0} + N_{2,0}$$

기업  $i$ 가  $t$ 시점에서 보유하게 되는 배출권의 순량(net amount)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_{i,t} &:= N_{i,0} + \sum_{s=0}^t X_{i,s} \\ &= N_{i,t-1} + X_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T-1, \end{aligned}$$

여기서,  $N_{i,t-1}$ 는 기업  $i$ 가  $t-1$ 시점까지 초기 배출권 부존량을 포함해서 거래한 모든 배출권의 한계물량의 합계를 나타낸다.

배출권의 총공급은 고정되어 있기 때문에, 시장청산조건은 다음과 같다.

$$\delta_{1,t} + \delta_{2,t} = N, \quad \forall t = 0, 1, \dots, T-1$$

혹은,

$$X_{1,t} = -X_{2,t} \quad \forall t = 0, 1, \dots, T-1$$

위의 시장청산조건이 의미하는 바는 균형에서는 배출권의 순공급이 영(0)이 되게끔 배출권 포지션이 정해진다는 것이다. 이것은 배출권시장에서 배

출권의 수요와 공급이 일치한다는 의미에서 경쟁균형조건이라고 할 수 있다. 기업  $i$ 의  $t$ 시점에서의 순수적 온실가스배출량은 다음과 같다.

$$\int_0^t Q_{i,s} ds - \delta_{i,t-1} \quad \forall t = 0, 1, \dots, T-1$$

$t \in [0, T]$ 시점에서 기업  $i$ 는 자신의 누적 온실가스배출량에 대해서는 완전한 정보를 가지고 있는 반면, 다른 기업  $j$ 의  $t-1 \in [0, T]$ 시점의 순수적 온실가스배출량( $\int_0^{t-1} Q_{j,s} ds - \delta_{j,t-1}$ )에 대해서는 부분적인 정보만 가지고 있다고 가정한다. 즉, 이러한 비대칭정보는 다른 기업의 미래 온실가스배출량의 조정된 기댓값에 대한 지행(遲行)효과(lag-effect)를 초래한다.

만약  $T$ 시점에서 두 기업 모두 배출권에 대한 수요가 없다면, 남아 있는 배출권의 가치는 없어진다. 반대로 한 기업이 배출권에 대한 수요가 있다면, 배출권의 가격은 온실가스발생에 대한 벌금 수준인  $P$ 와 같게 된다. 이러한 결과는 완전경쟁시장이라는 가정과 배출권 수요기업은  $T$ 시점에서 배출권구입이나 벌금지불이 무차별하다는 가정 하에서 성립한다. 수식으로 표현하면,  $T$ 시점에서의 배출권 가격은 다음과 같다.

$$S_T = \begin{cases} 0 & \text{if } \forall i \in I, \int_0^T Q_{i,s} ds \leq \delta_{iT-1} \\ P & \text{if } \exists i \in I, \int_0^T Q_{i,s} ds > \delta_{iT-1} \end{cases}$$

$T$ 시점에서의 배출권시장 구조와 맞게, 기업  $i$ 가 배출권 잉여상태에 있다면, 기업  $i$ 는 기업  $j$ 가 원하는 만큼 팔 수 있을 것이다:

$$\min \left\{ \left( \delta_{i,T-1} - \int_0^T Q_{i,s} ds \right)^+, \left( \int_0^T Q_{j,s} ds - \delta_{j,T-1} \right)^+ \right\} =: \Gamma$$

기업  $i$  배출권 잉여                  기업  $j$  배출권 부족

만약 기업  $i$ 가 배출권 초과수요상태에 있다면, 기업  $i$ 는 기업  $j$ 로부터 기업  $j$ 가 팔고자 하는 양만큼 살 수 있다:

$$\min \left\{ \left( \int_0^T Q_{i,s} ds - \delta_{i,T-1} \right)^+, \left( \delta_{j,T-1} - \int_0^T Q_{j,s} ds \right)^+ \right\} =: \Pi$$

기업  $i$  배출권 부족      기업  $j$  배출권 잉여

그러나 만약에  $\Pi < \left( \int_0^T Q_{i,s} ds - \delta_{i,T-1} \right)^+$ 이면, 기업  $i$ 는 배출권구입 초과분의 온실가스배출량에 대해서 단위당 벌금  $P$ 를 지불해야 된다. 따라서, 만기  $T$ 시점에서 배출권 판매기업과 구매기업 간의 물량 불일치가 발생할 가능성이 크기 때문에, 만기  $T$ 시점의 배출권물량에 관한 경계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_{i,T} = \left( \int_0^T Q_{i,s} ds - \delta_{i,T-1} \right)^+ - \Gamma, \quad \forall i \in I$$

$\Delta t$ 를 단위시간이라고 하자. 초기 배출권 부존량과 누적 온실가스배출량이 주어진 상태에서, 각 기업은 각 시점에서 총비용을 최소화하려고 한다. 예를 들어, 기업  $i=1$ 의 시점  $T-\Delta t$ 에서의 최소화문제는 다음과 같다.

$$\min_{X_{1,T-\Delta t}} \{ S_{T-\Delta t} \cdot X_{1,T-\Delta t} + e^{-\eta\Delta t} E_P [ S_T \cdot X_{1,T} | F_{T-\Delta t} ] \}$$

위 최적화의 1계조건은 다음과 같다.

$$0 = \overline{S_{T-\Delta t}} - e^{-\eta\Delta t} \cdot P \cdot E_P \left[ 1_{\int_0^T Q_{1,s} ds > \delta_{1,T-\Delta t}} \mid F_{T-\Delta t} \right] \\ - e^{-\eta\Delta t} \cdot P \cdot E_P \left[ 1_{\delta_{1,T-\Delta t} > \int_0^T Q_{1,s} ds} \cdot 1_{\int_0^T Q_{2,s} ds > \delta_{2,T-\Delta t}} \mid F_{T-\Delta t} \right]$$

$\int_0^t Q_{i,s} ds$ 가  $t$ 에 대해서 단조적으로 비감소함수이기 때문에, 다음의 식이 성립한다.

$$E_P[1_{\int_0^T Q_{1,s} ds > \delta_{1,T-\Delta t}} | F_{T-\Delta t}] = \begin{cases} \Phi(d_{1,T-\Delta t}) & \text{if } \int_0^{T-\Delta t} Q_{1,s} ds - \delta_{1,T-\Delta t} \leq 0 \\ 1 & \text{else,} \end{cases}$$

여기서,

$$d_{1,T-\Delta t} = \frac{\ln\left(\frac{Q_{1,T-\Delta t} \cdot \Delta t}{N_{1,T-2\Delta t} + X_{1,T-\Delta t} - \int_0^{T-\Delta t} Q_{1,s} ds}\right) + \left(\mu_1 - \frac{\sigma_1^2}{2}\right) \cdot \Delta t}{\sigma_1 \cdot \sqrt{\Delta t}}$$

그리고, 독립성에 의해서 다음이 성립한다.<sup>25)</sup>

$$E_P[1_{\delta_{1,T-\Delta t} > \int_0^T Q_{1,s} ds} \cdot 1_{\int_0^T Q_{2,s} ds > \delta_{2,T-\Delta t}} | F_{T-\Delta t}] = \Phi(-d_{1,T-\Delta t}) \cdot \Phi(d_{2,T-\Delta t}^{lag})$$

여기서,

$$d_{2,T-\Delta t}^{lag} = \frac{\ln\left(\frac{Q_{2,T-2\Delta t} \cdot 2\Delta t}{N_{2,T-2\Delta t} + X_{2,T-\Delta t} - \int_0^{T-2\Delta t} Q_{2,s} ds}\right) + \left(\mu_2 - \frac{\sigma_2^2}{2}\right) \cdot 2\Delta t}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2\Delta t}}$$

기업 1의 시점  $T - \Delta t$ 에서의 배출권 현물가격은 배출권 부족확률 가중

25) 실질적으로 말해서, ETS에서는 산업분류상 25개국의 5개의 산업에서 약 12,000개의 생산 설비를 포함하고 있다. 따라서 2개의 기업이 같은 산업에 속했다할지라도 다른 기술, 영업상 혹은 운영상의 요인에 의해서 영향을 받는다.

할인 별금수준으로 결정된다(부록 B 참조).

$$\begin{aligned} S_{T-\Delta t} &= e^{-\eta\Delta t} \cdot P \cdot [1 - \Phi(-d_{1,T-\Delta t}) \cdot \Phi(-d_{2,T-\Delta t}^{lag})] \\ &= e^{-\eta\Delta t} \cdot P \cdot [1 - \text{Pr}_{T-\Delta t}^1] \end{aligned}$$

여기서,  $\text{Pr}_{T-\Delta t}^1$  는 기업 1의 관점에서 볼 때, 두 기업 모두 미래에 배출권이 충족된 상태(non shortage)에 처할 확률을 의미한다.

유사하게, 기업 2에 대한 최적화문제를 풀면 다음을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{S_{T-\Delta t}} &= e^{-\eta\Delta t} \cdot P \cdot [1 - \Phi(-d_{2,T-\Delta t}) \cdot \Phi(-d_{1,T-\Delta t}^{lag})] \\ &= e^{-\eta\Delta t} \cdot P \cdot [1 - \text{Pr}_{T-\Delta t}^2], \end{aligned}$$

여기서,  $\text{Pr}_{T-\Delta t}^2$  는 기업 2의 관점에서 볼 때, 두 기업 모두 미래에 배출권이 충족된 상태(non shortage)에 처할 확률을 의미한다.

뒤로 돌아가서, 각 시점  $k \in [1, 2, \dots, T/\Delta t]$  에서 최적화문제를 반복해서 풀므로, 다음과 같은 한 쌍( $i \neq j$ )의 배출권가격의 공식을 얻게 된다:

$$\overline{S_{T-\Delta t}} = e^{-\eta k \Delta t} \cdot P \cdot \left\{ 1 - E_P \left[ \Phi(-d_{i,T-\Delta t}) \cdot \Phi(-d_{j,T-\Delta t}^{lag}) | F_{T-k\Delta t} \right] \right\}.$$

이 두 공식과 시장청산조건을 활용하여, 각 시점에서의 아래 조건을 만족시키는 배출권 수량을 평가함으로써 균형배출권가격을 수치적으로 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_P \left[ \Phi(-d_{i,T-\Delta t}) \cdot \Phi(-d_{j,T-\Delta t}^{lag}) | F_{T-k\Delta t} \right] \\ = E_P \left[ \Phi(-d_{j,T-\Delta t}) \cdot \Phi(-d_{i,T-\Delta t}^{lag}) | F_{T-k\Delta t} \right], \end{aligned}$$

여기서, 두 기업의 온실가스배출과정을 나타내는 파라미터들 ( $\{\mu, \sigma, Q_0, N_0\} \in R^2$ )은 주어졌다고 가정한다.



**마. 일반적인 경우: I개 회사 및 다기간 거래**

두 기업의 경우를 확장하여 기업의 I개 있는 경우를 고려해보자. 기업이 I개있는 일반적인 경우, 두 개의 부분집합으로 나눌 수 있다:  $I^- := \{1, 2, \dots, I\} - i$ 와  $i$ . 그리고  $I^-$ 에 속한 기업의 정보량은 동일하다고 가정한다. 확률배출과정의 파라미터들( $\{\mu, \sigma\} \in R^{I-1}$ )이 상수라고 가정하면, 누적 온실가스배출과정을 다음과 같이 근사할 수 있다(Brigo et al., 2002).

$$Q_{I^-,t} = \sum_{j=1, j \neq i}^I Q_{j,t}$$

이제 I개 기업과 다기간의 일반적인 경우를 상정하여, 배출권의 균형가격을 구해보면 다음과 같다(부록 D 참조).

**정리** (균형가격; Chesney and Taschini, 2008): 외생적으로 주어진 온실가스배출과정이 다음과 같이 주어졌다고 하자.

$$\{Q_{i,t}\}_{t=0}^T \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, I.$$

다음 조건들이 만족될 때, 균형배출권가격과정(equilibrium permit rice process)  $\bar{S} = \{\bar{S}_t\}_{t=0}^T$ 이 존재한다:

- 1)  $\exists \{\bar{X}_{i,t}\}_{t=0}^{T-\Delta t}$  for  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  
 s. t.  
 $\text{Pr}_t^i = \text{Pr}_t^{I^-} \quad \forall t = 0, \dots, T-\Delta t$ , and  $i = 1, 2, \dots, I$ .

2) 시장청산조건:

$$\sum_{i=1}^I \bar{X}_{i,t} = 0, \quad \forall t = 0, 1, \dots, T-\Delta t.$$

각 균형시점에서, 배출권 거래량과 배출권 가격은 두 배출권 순 포지션에 관한 가용한 정보와 누적 온실가스배출과정에 기초한 기업들의 배출권 포트폴리오 배분의 연속적인 조정의 결과로 결정된다.

일반적인 경우 배출권 가격은 두 개의 기업이 존재하는 경우가 확장된 형태이기 때문에, 가격의 특성도 두 개의 기업이 존재하는 경우와 이론적으로 거의 유사하다. 하지만, 한편으로는, 시장에 기업의 수가 많을수록, 실제적으로 기업들이 다른 기업들의 누적 배출량에 대한 기대를 형성하는 데 더 많은 시간과 비용이 들어간다고 할 수 있다. 그리고 기업의 수가 많으면, 어떤 경우는 기업들이 누적 배출량과 관련하여 전략적인 행동을 하는 경우도 발생할 수 있다. 시장이 효율적일수록 이러한 조정과정은 신속하게 일어나게 될 것이다.

### 3. 배출권가격 특성과 정책적 함의

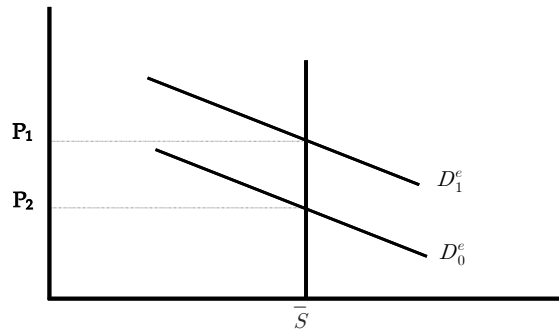
EU-ETS 탄소배출권가격의 특성을 정리하면 다음과 같다. 첫째, 만기에 가까워질수록 이진결과(binary outcome)의 특성을 보인다. 배출권가격의 최댓값은 배출권을 구매하지 않고 배출하는 경우 기업이 부담해야 할 벌금의 현재가치이다. 즉, 배출권가격이 벌금수준보다 비싸게 되면, 기업들은 벌금을 부담하는 것이 더 이득이기 때문이다. 그리고 기업들이 할당량 이하로 이산화탄소를 배출하여 배출권에 대한 수요가 없어지고 배출권의 초과공급이 발생하는 경우는 배출권의 가격은 0이 된다. 그래서 탄소배출권의 가격은 0과 벌금의 현재가치 사이에서 형성된다. EU-ETS의 경우 배출권량에 상응하는 배출권을 확보하지 못했을 경우에 받게 되는 벌금은 1단계 기간(2005~2007년)의 경우 이산화탄소 톤당 40유로이며, 2단계(2008~2012년)에서는 100유로이다. 따라서 이론적으로 1단계 기간의 배출권 시장가격은 이론적으로 40유로에 대한 현재가치를 넘을 수 없으며, 2단계에서는 100유로의 현재가치를 넘을 수 없다.

둘째, 배출권가격이 수렴하는 시점은 배출총량에 대한 정보가 밝혀지는 시점이다. 그리고 배출총량에 대한 정보는 만기시점이 가까워질수록 더 확실하게 밝혀진다. 물론 최종적으로 배출총량에 대한 정보가 밝혀지는 시점은 만기시점이다. 배출권공급은 정책적으로 초기시점에서 주어지기 때문에, 배출총량에 대한 정보는 만기이전에도 어느 정도 확실하게 예측 가능한 경우가 있을 것이다. 이런 경우 배출권가격은 예상 배출권 초과수요의 부호에 따라 0 또는 벌금수준의 현재가치로 수렴하게 된다. 물론 배출총량이기 때문에 개별기업측면에서 보면 전략적인 행동을 할 수 있는 여지는 있지만, 만기시점에 가까워질수록 이러한 개별기업의 전략적 행동으로 배출총량에 대한 예측이 급격하게 변하기는 쉽지 않을 것이다.<sup>26)</sup>

셋째, 배출권가격의 또 다른 특성은 변동성이 상대적으로 크다는 것이다. 배출권가격의 변동성은 배출권의 수요와 공급적 특성에 의해서 설명될 수 있다. 배출권 공급은 초기 할당량에 의해서 제도적으로 결정되는 경향이 있으며, 배출권 수요는 개별기업의 제품 생산량에 따른 온실가스 배출량과 저감노력, 타기업의 배출량과 저감전략 등에 의해서 결정되기 때문에 많은 불확실성이 존재한다. 즉, 단기적으로 고정된 무한 비탄력적 공급함수와 불확실성이 높은 수요함수를 의미한다. 따라서 수요함수에 대한 기댓값의 미세한 변화에도 가격이 급변하기 때문에 가격 변동성이 크다. 배출권 시장의 경직된 공급함수를 고려할 때, 배출권 가격은 배출총량이 배출권 할당총량에 미달할 것인가 혹은 이를 초과할 것인가에 따라 0에서 벌금수준의 현재가치 사이에서 변동하게 된다. 탄소배출권 가격이 수요부문의 불확실성으로 가격변동이 크다는 것은 다음 그림으로 설명할 수 있다. 즉 공급곡선이 수직이기 때문에 수요부문의 작은 변화는 그대로 모두 배출권의 가격변화로 전이되는 것이다.

26) 만기시점에 가까워질수록 이러한 경향은 더욱 강하게 될 것이다. 초기시점에서는 배출총량에 대한 불확실성이 크기 때문에, 초기시점의 개별기업의 전략적 행동은 배출총량에 대한 기댓값에 급격한 변화를 초래할 수도 있다.

&lt;그림 IV-7&gt; 배출권의 수급 및 가격형성



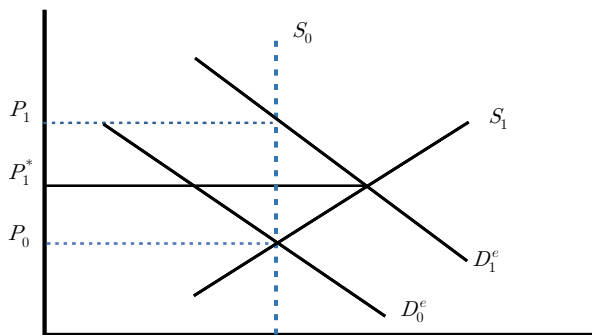
일부에서는, 배출권가격의 변동성이 크기 때문에, 이를 완화시키기 위해 서는 여러 가지 방법을 제안하고 있다. 그중의 하나는 배출권의 이월 (banking)을 허용하는 것이다. 배출권을 주어진 이행기간 이후에도 사용하 게 함으로써 배출총량이 배출권 할당총량보다 작은 상황이 발생하더라도 해당 이행기간의 초과공급이 가격을 0으로 하락하게 만드는 상황을 피할 수 있다. 또한 배출권의 차입(borrowing)을 허용할 경우에는 반대의 경우 (즉, 배출총량이 배출권 할당총량을 초과함으로써 배출권 가격이 상한선(벌 금수준)까지 치솟는 경우)에 가격불안정을 해소할 수 있다. 배출권의 이월 과 차입은 이처럼 가격 불안정성을 완화하면서 동시에 이행기간간에 배출 삭감노력을 효율적으로 배분할 수 있게 하는 장점도 갖는다. 하지만 이월과 차입의 무제한적 허용(특히 차입의 경우)은 배출삭감 유인을 약화시키고 배 출삭감효과를 감소시킬 수 있기 때문에 적절한 규제가 필요하다. 무엇보다도 미래의 차기 또는 차차기 이행기간의 배출권 공급에 대한 정부의 명확 한 계획이 확정되지 않는 경우에 이월 및 차입의 경제적 가치가 매우 불확 실하게 되고, 시장의 불안정성을 완화하는데 의미있는 역할을 하지 못할 수 있다.

배출권가격의 변동성을 줄이기 위해서 다양한 정책적 대안들은 국제사회 에서도 큰 관심거리가 되어 왔다. 국제기후협상을 비롯하여 많은 국제연구 기관들도 '안정적'이고 '장기적'인 국제적 탄소가격 형성을 가장 중요한 정

책방향의 하나로 제시하고 있기 때문이다. 하지만 배출권가격 수준에 대한 직접적인 규제는 오히려 배출권시장을 왜곡시킬 가능성이 있다. 현재의 가격변동성은 미래의 불확실성을 반영한 합리적인 수준이라고 판단할 필요가 있다. 만약 배출권가격 수준을 직접적으로 규제하는 경우,27) 오히려 배출권 가격에 왜곡이 발생하여 본래 취지의 정책적 목적을 달성할 수 없는 경우가 발생할 수도 있기 때문이다.

배출권가격의 변동성이 큰 원인은 무한 비탄력적인 배출권 공급곡선의 특성에 기인하는 바가 크므로 배출권가격 변동성을 줄이기 위해서 배출권 공급곡선의 탄력성을 도입하는 것을 고려해볼 수 있을 것이다. 즉, 배출권 공급을 초기에 고정하는 것보다는 가격 수준에 따라 배출권공급을 조절할 수 있도록 하는 것이다. 물론 이 탄력적 배출권공급곡선의 경우, 탄소배출 감축이라는 전체 목표 안에서, 가격의 변동성을 줄이는 수준으로 결정되어야 할 것이다. 그리고 임의성을 배제하기 위해서 공급의 가격탄력성 수준을 정책적으로 미리 정하는 것도 바람직할 것이다. 즉, 가격탄력성이 있는 배출권공급곡선을 도입하는 경우, 배출권수요의 변화에 따라서, 수직적 공급곡선의 경우에는  $P_1$  수준에서 결정되었으나, 탄력적 공급곡선의 경우에는  $P_1^*$  수준으로 결정되어 변동폭이 감소하게 된다.

<그림 IV-8> 탄력적 공급곡선의 도입과 배출권가격의 변동성



27) 예를 들자면, 배출권가격의 새로운 상한 및 하한을 도입하는 정책을 말한다.

그리고 기후변화대응이라는 장기적인 과제를 해결하는 과정에서, 탄소배출권시장 역시 장기적인 관점에서 운영될 수 있도록 하는 정책적 일관성이 매우 중요하다고 할 수 있다. 각 운영단계에서의 단기적 가격 변동성에 대한 규제정책보다는, 장기적 정책일관성을 유지하여 배출권거래시장이 지속적으로 운영된다는 신호(signal)를 보내는 것이 더 중요한 것이다. 탄소배출권 거래시장의 특성상 배출권 공급량이 정책적으로 결정되기 때문에, 이러한 장기적 정책 일관성의 결여는 곧바로 배출권거래시장의 존립을 위협하기 때문이다.