

쿠르노 경쟁하의 배출권 이월 및 차입과 감축기술개발투자*

정경화¹⁾**·심성희²⁾***

Environment R&D Incentives with Emission Banking and Borrowing in a Cournot Model*

Kyonghwa Jeong¹⁾**·Sunghee Shim²⁾***

1) 목포대학교 조교수(Mokpo National University)

2) 에너지경제연구원 연구위원(Korea Energy Economic Institute)

제출 : 2015년 8월 28일 수정 : 2015년 12월 11일 승인 : 2015년 12월 23일

국문요약

배출권 이월 및 차입은 감축기술개발투자에 영향을 미칠 수 있다. 배출권거래제하에서 이월 및 차입이 허용되면 감축비용과 배출권 가격에 따라 배출권거래제 참여기업들은 현재의 감축을 미래로 또는 미래의 감축을 현재로 선택할 수 있기 때문에 배출권 이월 및 차입은 감축기술개발에 대한 대체재적인 역할을 한다. 따라서 배출권 이월 및 차입과 같은 간접감축이행수단을 허용하는 경우에는 직접감축이행수단인 감축기술개발투자에 영향을 미친다. 불완전경쟁 시장에서 이러한 간접감축조치가 감축기술개발투자에 미치는 영향은 완전경쟁시장하에서와 달라질 수 있다. 왜냐하면 과점시장의 쿠르노 경쟁하에서 감축기술개발투자가 최종소비재시장의 균형에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 분석 결과, 배출권 이월 및 차입으로 인한 감축기술개발투자 유인 수준은 감축비용, 할인계수, 초기무상할당, 감축기술개발투자효과 등에 의존한다.

주제어 쿠르노 경쟁모델, 불완전경쟁, 기술개발, 배출권거래제, 경제학문헌목록 주제분류 : L13, L50, Q28

Abstract

Banking and borrowing under the ETS may affect the low carbon technology investment level. If the indirect implementation measures are allowed, firms can gradually adjust their carbon reduction costs between implementation periods based on their carbon reduction costs and emission price forecasts. This implies that banking and borrowing may reduce or increase the level of low carbon technology R&D investment. In an oligopoly market, the effects of the measures are quite different from the ones in a perfectly competitive market. This is because the indirect implementation measures can shift market competition in Cournot competition model. The effects of banking and borrowing on the carbon reduction R&D investments depend on emission reduction costs, marginal production costs, discount rate, initial free allocation, and the cost reduction effects of R&D investment.

Keywords Cournot Competition, Emission Trading Scheme, R&D Incentives

* 본 논문은 에너지경제연구원 기본연구보고서 「배출권거래제 시행에 따른 우리나라 기업의 대응 및 성장전략 연구」의 일부 내용을 수정·보완하여 게재한 논문입니다. 본 논문의 개선을 위해서 많은 조언을 하여 주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다.

** 제1저자, jeongkyo@mokpo.ac.kr

*** 교신저자, hsims@keei.re.kr

I. 서론

배출권거래제 참여기업들은 규제기관이 부여한 계획기간별, 이행연도별 감축목표를 달성해야 한다. 감축목표를 달성하는 방법으로는 에너지효율이 높은 신기술을 도입하여 탄소원단위(배출량/에너지소비량)를 줄이거나 자체적으로 설비 효율성 향상을 위한 기술 개발투자를 통해 배출을 줄이는 직접적인 감축수단이 있다. 또한, 탄소배출이 전혀 없거나 적게 배출하는 에너지원으로 연료를 전환함으로써도 감축목표를 달성할 수도 있다. 이외에도 배출권 시장에서 배출권을 구매하거나 배출권 이월 및 차입제도를 활용하여 주어진 감축목표를 달성할 수 있다. 이러한 다양한 감축수단을 활용할 수 있는 점에서 효율성과 유연성을 갖춘 배출권거래제는 온실가스에너지목표관리제와 같은 직접규제방식보다 비용 효과적인 것으로 평가된다. 이것은 배출권거래제가 사회 전반에 걸쳐 감축비용이 가장 낮은 감축기술을 이용할 수 있도록 하는 시장에 기반을 두고 있기 때문이다. 또한, 배출권거래제는 이월 및 차입과 같은 제도적 감축이행수단을 제공함으로써 참여기업들에게 감축목표 달성에 시간적인 유연성을 제공한다.

배출권거래제 참여기업이 활용할 수 있는 제도적 감축이행수단 중에서 배출권 이월 및 차입제도(이하 이월 및 차입)는 감축기술개발에 대한 대체재적인 특성이 있다. 이월 및 차입은 미래 기술진보, 감축비용, 배출권 가격 등에 대한 전망에 따라 감축기술개발투자를 촉진할 수도 있고 저해할 수도 있다. 또한, 이월 및 차입이 감축기술개발투자 유인에 미치는 영향은 시장경쟁구조에 따라 달라질 수 있다. 과점기업들의 전략적 선택은 경쟁기업의 상대적 생산비용이나 감축비용에 영향을 미치는 전략적 효과(strategic effect)를 낳는 특징이 있다. 이러한 전략적 효과로 인해 과점기업들의 감축기술개발투자효과는 완전경쟁기업들의 감축기술개발투자효과와는 달라진다. 따라서 이월 및 차입이 허용되는 경우와 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우에 과점기업들의 감축기술개발투자의 유인 순위를 비교할 필요가 있다.

배출권거래제의 비용 효과성은 감축기술개발투자가 활성화되어 사회 전체적으로 감축비용이 낮아지는 데서 발생된다는 것은 널리 알려진 사실이다. 투자자들의 감축기술개발 투자는 배출권 시장에 대한 기대에 크게 의존한다. 즉, 탄소시장에서의 가격 신호 기능이 제대로 작동되는 경우에 투자에 대한 미래 가치가 높아져 감축기술개발투자가 촉진될 수 있다. 만일 탄소 가격이 적정수준을 유지하지 못하는 경우나 미래에 탄소 가격이 그 수준에 미치지 못할 것이라고 예상되는 경우에는 감축기술개발투자는 미미할 것이기 때문에

배출권거래제의 효율성은 기대하기 어렵다. 따라서 배출권거래제 참여기업에게 이월 및 차입과 같은 제도적 감축이행수단이 존재할 때에 발생하는 감축기술개발투자와 이월 및 차입이 허용되지 않을 때에 발생하는 감축기술개발투자의 유인 순위를 비교하는 것은 정책 수립과 평가에 매우 중요한 작업이라고 할 수 있다.

배출권 이월은 미래 이행연도의 감축목표 달성에 사용할 수 있기 때문에 초기 이행연도에 감축사업투자를 촉진시키는 기능이 있다. 그러나 장기적으로 볼 때 이러한 초기 감축투자가 비용 효과적인지에 대한 평가는 미래 감축기술개발의 성과와 밀접하게 관계된다. 다시 말하면, 이월은 참여기업들이 감축비용을 이행연도 간에 비용 효과적으로 조절할 수 있도록 유연성을 제공하지만, 미래에 초기 기술개발사업보다 월등히 비용효과적인 신기술이 개발되는 경우에 감축비용은 이월이 허용되지 않는 경우보다 더 높아질 수도 있다. 만일 이월이 허용되지 않는 경우에는 초기에 감축기술개발투자가 과대하게 발생하지 않고 미래 기술진보와 더불어 효율적인 대체기술의 도입으로 감축비용을 줄일 수도 있다. Burtraw and Mansur(1999)는 미국 SO₂ 프로그램에서 배출권 이월이 허용됨으로써 감축이행비용이 상승한 것으로 분석하였다. 그 이유는 SO₂ 배출권거래제 초기에 배출권을 이월하고자 사업자들이 현존 기술설비투자를 많이 하였으나, SO₂ 프로그램이 진행되면서 기술진보가 상당한 수준으로 이루어졌기 때문이다.

'90년대에 시작된 미국 SO₂ 배출권거래제에서 배출권 이월이 허용되었다. 이에 따라 배출권 이월이 감축기술개발투자에 미치는 영향에 대해 이론적 연구와 더불어 실증적 연구가 함께 이루어졌다. 기존 연구들은 배출권 이월이 감축기술개발투자에 미치는 영향에는 긍정적인 면과 부정적인 면이 있다는 혼합된 결과를 보이고 있다. 대부분의 연구들은 완전경쟁시장을 가정하고 미래 배출권 가격에 대한 전망이 긍정적일 경우 참여기업들이 이월 전략을 취할 유인이 있는 것으로 분석하였다(Cronshaw, Kruse, 1996; Rubin, 1996; Kling, Rubin, 1997). Cronshaw and Kruse(1996)은 이산시간모형(discrete time model)을 이용하여 완전경쟁시장에서 기업들이 배출권 가격이 이행연도 간에 이자율만큼 상승되면 배출권을 이월시킬 유인이 있는 것으로 분석하였다. Rubin(1996)은 Cronshaw and Kruse의 연구를 확장한 연속시간모형(continuous time model)을 이용하여 배출권 이월이 허용될 때 기업들의 감축비용이 가장 낮아질 것이라고 분석하였다. Kling and Rubin(1997)은 Rubin과 유사한 분석틀을 이용하여 기업들이 사회적으로 바람직한 이월량을 선택하지 않을 수 있으며, 이에 따라 사회 전체적으로 보면 사회후생을 반드시 증가시키지 않을 수 있다고 분석하였다. Rubin and

Kling(1993)은 경량자동차제조업을 대상으로 하여 배출권거래제와 이월전략에 대한 계량적 분석을 통하여 이월전략이 비용을 감소시키는 효과가 있음을 보였다.

한편 불확실성이 존재하는 시장에서 배출권 이월 및 차입이 사회후생에 미치는 효과를 분석한 연구도 다수가 있다(Requate, 1998; Yates, Cronshaw, 2001; Godby et al., 1997; Phaneuf, Requate, 2002). Requate(1998)은 완전경쟁시장에 존재하는 기업들의 감축비용이 불확실한 경우에 배출권 이월은 후생을 증가시킬 수 있는 것으로 분석하였다. Yates and Cronshaw(2001)은 규제기관보다 더 많은 감축비용 정보를 지닌 완전경쟁기업들이 존재하는 배출권시장의 경우(비대칭정보)에 어떤 특정 기간에 배출이 집중되어 사회적으로 손실을 입을 수 있더라도 배출권 이월 및 차입을 허용하는 것이 후생을 증진시킬 수 있는 것으로 분석하고 있다. Godby et al.(1997)은 불확실성이 존재하는 경우에 이월 쿠폰 및 배출권이 효율성과 가격에 미치는 영향을 실험실 실험(laboratory experiment)을 통해 분석하였다. 그들은 배출권 이월이 허용되지 않을 때 불확실성이 상당한 가격의 불안정성을 야기하고, 배출권 이월은 그러한 불안정성을 제거하는 것으로 결론짓고 있다. Phaneuf and Requate(2002)는 완전경쟁시장에 있는 배출권거래제 참여기업에게 있어 배출권 이월이 감축기술개발에 미치는 효과를 이론적으로 분석한 결과, 불확실성이 없을 때 이월은 저탄기술개발투자에 대한 인센티브를 왜곡시킬 수 있는 반면, 불확실성이 있는 경우에는 사회후생을 증대시키는 것으로 결론짓고 있다.

본 분석에서는 배출권거래제 참여기업들이 물량경쟁을 하는 과점기업을 고려하고 있는 점에서 완전경쟁시장을 가정하고 있는 기존 연구들과 차별된다. 시장경쟁구조에 따라서 배출권 이월 및 차입이 감축기술개발투자에 미치는 효과가 달라질 수 있다. 어떤 시장이 완전경쟁시장인 경우 경제적 효율성을 달성할 수 있다는 것은 널리 알려진 바이다. 그러나 현실 경제에 있어 최종소비재시장은 완전경쟁시장과 거리가 멀다. 또한, 배출권시장의 경우에 있어서도 배출권거래제 참여기업들 중에서 주요 시장참여자로 분류될 수 있는 기업들이 얼마 되지 않는 점을 고려하면 완전경쟁시장과는 다르게 운영될 것으로 예상된다.¹⁾ 산업조직론의 기술개발모델에 의하면 완전경쟁시장하에서와 불완전경쟁시장하에서 기업들의 기술개발에 대한 인센티브는 그 규모가 다르다. 그 이유는 과점시장에서는 기업들이 기술개발을 하나의 전략적 대체재 또는 전략적 보완재로 활용할 수 있기 때문이다. 전형

1) 온실가스 배출권거래제의 경우 다양한 제품 시장에서 경쟁하는 기업들이 참여하므로 본 논문에서 설정한 모형과 다소 차이가 있는 것처럼 보인다. 그러나 현실에서 많은 최종소비재시장은 완전경쟁시장이 아니다. 또한, 배출권 시장도 완전 경쟁적이지 않을 수도 있는데, 그 이유는 소수의 기업들이 상당한 규모의 배출량을 기록하면서 배출권시장에서 과점기업처럼 행동할 수 있기 때문이다.

적인 생산비용 절약 기술개발투자는 전략적 대체재로서 경쟁기업의 상대적인 비용을 상승시킴으로써 기술개발투자를 진행하는 기업의 시장점유율을 높인다. 따라서 과점시장에 참여하는 기업들은 완전경쟁시장에 참여하는 기업보다 기술개발을 할 유인이 더 크게 작동할 수 있다.

다음 장에서는 배출권거래제에 참여하는 과점기업들의 기술개발투자효과를 이론적으로 분석하기 위한 기본 모델을 소개한다. III장에서는 게임이론분석을 이용하여 배출권 이월 및 차입이 도입되지 않는 상황과 배출권 이월 또는 차입이 허용되는 경우를 구분하여 감축기술개발투자 효과를 분석한다. IV장에서는 특정 수요함수를 가정하여 시뮬레이션을 시도한다. 이 경우에 과점기업들이 배출권 이월 및 차입을 전략적으로 선택하는 경우에 감축기술개발투자에 대한 유인이 더 큰 것을 보이고 있다. 마지막으로 V장에서는 이론적 분석 결과를 토대로 배출권거래제 참여기업의 감축이행 포트폴리오 전략 수립을 위한 시사점을 제시한다.

II. 모형

본 장에서는 배출권 이월 및 차입이 감축기술개발투자에 미치는 영향을 분석하기 위하여, Montero(2002a, 2002b)의 모형을 이월 및 차입이 가능한 형태로 수정한 모형을 소개한다.²⁾ 기업 F1과 F2은 최종소비재시장에서 전형적인 쿠르노 물량경쟁(Cournot Model)을 하고 있으며, 정부로부터 환경규제 참여업체로 지정받아 배출권거래제에 참여하고 있다. 기업 F1과 F2는 1기와 2기에 걸쳐 $P = P(Q)$ 의 역수요함수를 직면하고 있으며, 배출권 이월 및 차입을 포함하여 모든 점에서 동질적(symmetric)이라고 가정한다. 여기서 P 는 최종소비재의 시장가격을 나타내고, Q 는 기업 F1과 F2의 생산량을 합한 것이다. 모형의 단순화를 위해 기업 F1과 F2의 한계생산비용은 영(0)이고, 탄소 배출량은 감축 노력을 하기 전에는 생산하는 만큼 탄소를 배출(q_i)하는 것으로 가정한다.

대부분의 국내외 배출권거래제도는 참여기업들이 주어진 감축목표를 보다 유연하게 이행할 수 있도록 배출권의 이월 또는 차입을 허용하고 있다. 기업 i 의 1, 2기 배출권 이월량 또는 차입량은 각각 B_{1i} 과 B_{2i} 로 나타내며, 정부는 기업들이 이월 또는 차입할

2) Montero(2002a, 2002b)에서는 직접규제, 탄소세, 배출권거래제(유무상할당)에 따른 기술개발투자유인 순위를 비교한 반면, 본 분석에서는 배출권 이월 및 차입이 허용되는 경우와 허용되지 않는 경우에 발생하는 기술개발투자유인을 비교 분석한다.

수 있는 수량을 \bar{B} (최대 상한)으로 제한한다고 가정한다($0 \leq B_i < \bar{B}$).³⁾ 기업 F1과 F2가 이월 및 차입이 허용되는 경우에 이행하는 감축량(R_{1i}, R_{2i})은 감축노력을 하기 이전의 배출량(q_i)에서 배출감축노력을 한 이후의 배출량(e_i)을 뺀 감축분($q_i - e_i$)에 이월분 또는 차입분(B_i)을 합한 양이 된다. 즉, 배출권거래제하에서 배출권 이월을 반영한 기업 i 의 1기 감축량은 $R_{1i} = q_{1i} - e_{1i} + B_i$ 이고, 배출권 차입을 반영한 기업 i 의 2기 감축량은 $R_{2i} = q_{2i} - e_{2i} + B_i$ 이 된다.

기업 i 는 1기와 2기 감축기술개발을 통해 감축비용을 절감할 수 있다. 기업 i 의 1기 감축비용은 K_i 의 감축기술개발투자를 통해 $k_i C_{1i}(R_{1i})$ 로 감소될 수 있으며, 2기 감축비용은 G_i 의 감축기술개발투자를 통해 $g_i C_{2i}(R_{2i})$ 로 감소될 수 있다. k_i 와 g_i 는 기업 i 의 1, 2기 감축기술개발투자 K_i 와 G_i 의 결과로, 각각 $k_i = f_{1i}(K_i)$, $g_i = f_{2i}(G_i)$ 인 것으로 가정한다. 여기서 f 는 $f(0) = 1$, $f(\infty) > 0$, $f' < 0$, $f'' > 0$ 의 특성을 가진다. 즉, 감축기술개발 투자가 이루어지지 않는 경우에 감축기술개발투자효과는 발생하지 않으므로 $k_i = 1$, $g_i = 1$ 가 되고, K_i 의 1기 감축기술개발투자가 발생하면 1기 기업 i 의 감축비용은 $k_i C_{1i}$, $0 < k_i < 1$, G_i 의 2기 감축기술개발투자가 발생하면 2기 기업 i 의 감축비용은 $g_i C_{2i}$, $0 < g_i < 1$,이 된다. 탄소감축비용은 감축량의 규모에 따라 달라질 수 있기 때문에 시나리오별 비교에 있어 수학 기호의 혼동을 최소화하기 위하여 감축비용에 대한 수학 기호를 시나리오에 따라 별도로 사용한다. 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우의 감축비용은 C_i , 이월이 허용되는 경우에는 M_i , 차입이 허용되는 경우에는 N_i 으로 표기한다. 따라서 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우에 기업 i 의 1, 2기 감축비용은 각각 $C_{1i}(q_{1i} - e_{1i})$, $C_{2i}(q_{2i} - e_{2i})$ 이다. 배출권 이월이 허용되는 경우에 기업 i 의 1, 2기 감축비용은 각각 $M_{1i}(q_{1i} - e_{1i} + B_i)$, $M_{2i}(q_{2i} - e_{2i})$ 이다. 마지막으로 배출권 차입이 허용되는 경우에 기업 i 의 1, 2기 감축비용은 각각 $N_{1i}(q_{1i} - e_{1i})$, $N_{2i}(q_{2i} - e_{2i} + B_i)$ 이다. 시나리오에 따른 감축비용은 $C_i' > 0$, $C_i'' > 0$, $M_i' > 0$, $M_i'' > 0$, $N_i' > 0$, $N_i'' > 0$ 의 특징을 갖는 일반적인 비용함수를 가정한다.

배출권거래제는 일반적으로 각 기간 그리고 연도별로 배출총량이 제한되기 때문에 1, 2기 참여기업들의 배출량의 합(\bar{E}_1, \bar{E}_2)은 각각 $\bar{E}_1 = e_{1i} + e_{1j}$, $\bar{E}_2 = e_{2i} + e_{2j}$ 인 것으로

3) 국내 배출권거래제하에서 이월은 한도 없이 계획기간 내의 다음 이행년도 또는 다음 계획기간의 최초 이행년도로 이월할 수 있으나, 차입은 해당 이행연도에 할당받은 배출권의 10% 범위 안에서만 차입할 수 있고 계획기간 간에는 차입이 불가능하다.

가정한다. 또한, 1, 2기의 총배출량은 $\bar{E}_1 + \bar{E}_2 = \bar{E}_t$ 으로 제한되어 있다. 이러한 각 기간별 최대 배출허용량은 이월 또는 차입이 허용되지 않는 경우의 조건들이다. 배출권 이월 또는 차입이 허용되는 경우에는 각 기간의 배출량은 이월분 또는 차입분이 가감되기 때문에 $\bar{E}_1 = e_{1i} + e_{1j}$ 과 $\bar{E}_2 = e_{2i} + e_{2j}$ 의 조건은 필요로 하지 않는다. 그러나 배출권 이월 또는 차입이 허용되는 경우라도 1기와 2기 총배출량의 합은 $\bar{E}_1 + \bar{E}_2 = \bar{E}_t$ 을 만족하여야 한다.

정부는 1, 2기 초기무상할당($\epsilon_1 \geq 0, \epsilon_2 \geq 0$)을 통해 기업들의 배출감축의무의 강도를 조절할 수 있다. 배출권거래제의 도입 초기에는 참여기업에게 적응할 수 있는 기회를 제공하는 차원에서 일반적으로 무상할당비율을 100% 또는 매우 높은 수준으로 설정한다. 반면 배출권거래제 도입 이후 일정 기간이 경과한 이후에는 상당한 수준의 배출권을 경매를 통해 구매하도록 하는 유상할당방식을 취한다. 배출권거래제하에서 감축목표를 반영한 초기무상할당량(ϵ_i)은 기업의 감축노력을 하기 이전의 배출량(q_i)보다 많지 않을 것이나 ($0 \leq \epsilon_i \leq q_i$), 기업의 감축노력을 한 이후의 배출량(e_i)은 초기무상할당량(ϵ_i)보다 적다고 ($0 \leq e_i \leq \epsilon_i$) 가정한다.

기업 F1과 F2는 두 기간($t=1, 2$)에 걸쳐 배출권 시장에 참여하며 최종소비재시장에서 물량경쟁을 한다. 각 기간에 1단계로 기업 i 는 감축기술개발수준(K_i, K_j 과 G_i, G_j)을 결정한 후, 2단계에 배출량(e_i, e_j)과 배출권 이월량 또는 차입량(B_i, B_j)을 결정한다. 마지막으로 3단계에 물량경쟁(q_i, q_j)을 한다. 배출권 이월에서는 기업 i 가 1기 감축목표를 초과 달성하고 남은 잉여 배출권을 2기의 감축목표에 사용할 수 있는 반면, 차입에서는 1기 감축목표 달성에 2기의 배출허용량을 사용할 수 있다. 따라서 배출권 이월이 발생하는 경우에는 2기 배출량(e_{2i})에서 이월량(B_i)을 제외하고 배출권을 구매하는 반면, 배출권 차입이 발생하는 경우에는 1기 배출량(e_{1i})에서 차입량(B_i)를 제외하고 의무달성을 충족 시키기 위한 배출권을 구매한다.

전형적인 경제학 모델에서는 기업 i 가 1, 2기의 이윤을 합한 이윤함수로부터 최적의 감축기술개발투자(K_i, G_i)를 구한다. 본 장에서는 Montero(2002a, 2002b)의 방법론을 차용하여 기업 i 의 수익함수를 감축기술개발투자로 발생하는 감축비용감소효과 k_i, g_i 에 대하여 전미분하여 이월 및 차입 제도가 도입되는 경우와 도입되지 않는 경우에 감축 기술개발투자의 유인 순위를 비교하는 방법론을 선택한다.⁴⁾ 즉, 기업 i 의 이윤함수

$\pi_{1i}(K_i) - v_i K_i + \rho[\pi_{2i}(G_i) - w_i G_i]$ 를 전미분하여 도출하는 이월 및 차입이 허용되는 경우의 $|d\pi_i/dk_i| + |d\pi_i/dg_i|$ 과 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우의 $|d\pi_i/dk_i| + |d\pi_i/dg_i|$ 를 비교함으로써 감축기술개발에 대한 유인 순위를 비교한다. $\pi_{1i}(K_i)$ 는 1기 감축기술개발 투자자 K_i 인 경우에 발생하는 기업 i 의 1기 이윤이고, $\pi_{2i}(G_i)$ 는 2기 감축기술개발투자자 G_i 인 경우에 발생하는 기업 i 의 2기 이윤이다. 기업 i 의 2기 이윤의 현재가치를 계산하기 위하여 할인계수($0 < \rho < 1$)를 적용한다. $v_i K_i$, $w_i G_i$ 는 각각 1, 2기의 감축기술개발투자 비용이다. v_i , w_i 는 각각 다음 식을 만족시키는 값들이다:

$$\frac{d\pi_i}{dK_i} = \frac{d\pi_i}{dk_i} f'_1(K_i) = v_i, \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d\pi_i}{dG_i} = \frac{d\pi_i}{dg_i} f'_2(G_i) = w_i, \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $f(0) = 1$, $f(\infty) > 0$, $f' < 0$, $f'' > 0$, $v_i > 0$, $w_i > 0$ 이다. 식 (1)과 식 (2)에서 최적의 감축기술개발투자 K_i 과 G_i 는 각각 $d\pi_i/dK_i = v_i$ 과 $d\pi_i/dG_i = w_i$ 을 만족해야 한다. 또한, $f' < 0$, $v_i > 0$, $w_i > 0$ 이므로 $d\pi_i/dk_i$ 과 $d\pi_i/dg_i$ 는 음(-)의 부호를 가진다. 이것은 1, 2기 감축기술개발투자(K_i , G_i)가 이루어짐에 따라 k_i 와 g_i 가 작아지고 감축비용($k_i C_{1i}$, $g_i C_{2i}$)이 낮아져 기업 i 의 이윤(π_i)은 높아지는 것을 의미한다. 종합하면, 식 (1)과 식 (2)에 의해 정책들 간의 $d\pi_i/dK_i + d\pi_i/dG_i$ 에 대한 비교는 정책들 간의 $|d\pi_i/dk_i + d\pi_i/dg_i|$ 의 비교로 대체 될 수 있다.⁵⁾ 따라서 배출권 이월 및 차입이 허용되는 경우의 $|d\pi_i/dk_i| + |d\pi_i/dg_i|$ 의 규모가 허용되지 않는 경우의 $|d\pi_i/dk_i| + |d\pi_i/dg_i|$ 의 규모보다 크다면, 이월 및 차입이 허용되는 경우에 더 많은 감축기술개발투자를 유인한다고 할 수 있다.

우리는 배출권거래제하에서 크게 2가지 감축이행조치가 취해 질 수 있다고 가정하여 감축기술개발투자 효과를 살펴본다: 1) 배출권 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우, 2) 배출권 이월 또는 차입이 허용되는 경우이다. 과점기업들의 1, 2기 수익극대화 문제는

4) Montero(2002a, 2002b)의 방식은 최적의 감축기술개발투자수준을 직접 구하는 데서 발생하는 모델의 복잡성을 회피하고 분석 결과에 대한 직관적인 해석을 용이하게 할 수 있기 때문에 본 연구에서 그의 방법론을 차용한다.
 5) 통상적으로 임의의 감축기술수준에 대한 특정 정책 수단의 이윤증대 효과가 다른 정책 수단에 비해 높을수록 기술개발투자유인이 더 크다. 즉, 임의의 기술수준 k 에 대해 $\Delta\pi^a(k) > \Delta\pi^b(k)$ 일 경우, (a와 b는 정책 수단) a가 더 높은 R&D 유인을 제공한다. 그러나 $\Delta\pi(k)$ 를 직접 비교하지 않더라도 최적 수준에서의 전도함수의 크기를 비교함으로써 동일한 결론을 얻을 수 있다. 이에 대한 자세한 설명은 Montero(2002a)를 참조하라.

후진귀납법(backward induction)을 이용하여 해결한다.⁶⁾ 배출권 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우와 이월 또는 차입이 허용되는 경우로 분리하여 감축기술개발투자 효과를 살펴본다. 기업들의 수익극대화 문제는 다음과 같은 순서대로 진행된다. 각 기간($t=1,2$) 별로 3단계에서 기업들은 물량경쟁을 통해 최적의 판매량(q)을 구한 뒤, 2단계에서 균형 배출량(e)과 이월량 또는 차입량(B)을 결정한다. 마지막으로 1단계에서 최적의 감축 기술개발투자수준(K, G)를 결정한다.

III. 균형

1. 배출권 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우와 감축기술개발

본 절에서는 기업 F1과 F2가 배출권 이월 및 차입을 활용할 수 없는 경우에 이들 기업의 감축기술개발투자에 대한 인센티브를 살펴본다.

후진귀납법을 이용하여 문제를 해결하므로, 3단계인 최종소비재시장에서의 최적 생산량 결정 문제를 먼저 해결한다. 기업 i 는 1, 2기 이윤을 합한 다음과 같은 전체 이윤을 극대화한다:

$$\begin{aligned} \text{Max } & P_1 q_{1i} - k_i C_{1i}(q_{1i} - e_{1i}) - \sigma_1(e_{1i} - \epsilon_{1i}) \dots\dots\dots (3) \\ & + \rho(P_2 q_{2i} - g_i C_{2i}(q_{2i} - e_{2i}) - \sigma_2(e_{2i} - \epsilon_{2i})), \end{aligned}$$

여기서, ρ 는 기업 i 의 2기 이윤에 적용되는 할인계수이다. q_{1i}, q_{2i} 는 각각 기업 i 의 1, 2기 생산량을, P_1, P_2 는 각각 1, 2기의 최종소비재의 시장가격을 나타낸다. $k_i C_{1i}, g_i C_{2i}$ 은 각각 1, 2기 기업 i 의 감축량(R_{1i}, R_{2i})에 따른 감축비용이다. 감축노력을 하기 이전의 탄소 배출량은 생산하는 만큼 탄소를 배출(q_i)하는 것으로 가정하고 있으므로, 감축량(R_{1i}, R_{2i})은 감축노력을 하기 이전의 배출량(q_i)에서 배출감축노력을 한 이후의 배출량(e_i)을 뺀 감축분($q_i - e_i$)으로 나타난다. $\epsilon_{1i}, \epsilon_{2i}$ 는 각각 기업 i 가 규제기관으로부터

6) 후진귀납법은 게임이론분석에 전형적으로 이용되는 방법론으로, 본 연구에서와 같이 3단계로 구성된 순차적인 게임을 해결하기 위해 사용한다. 즉, 기업들은 감축기술개발투자수준을 결정하는 데 있어 다음 단계에서 발생하는 이월량 또는 차입량을 예상한 뒤에 최적의 전략을 선택하는 것이다. 이월 및 차입의 결정은 그 다음 단계에서 발생하는 물량경쟁을 예상하여 최적의 전략을 선택하는 것이다. 따라서 물량경쟁문제를 해결한 뒤에 이를 이월 및 차입 전략 수립 단계에서 반영하여 최적의 이월 및 차입 전략을 수립한다. 그리고 앞에서 구한 최적의 이월량 및 차입량을 감축기술개발투자 결정에 반영하여 문제를 해결한다.

할당 받는 1, 2기의 초기무상할당량이고, e_{1i}, e_{2i} 는 각각 기업 i 가 1, 2기 감축노력을 한 이후의 배출량을, σ_1, σ_2 는 각각 1, 2기의 배출권 시장가격을 나타낸다.

식 (3)을 q_{2i}, q_{1i} 에 대해 각각 미분한 기업 i 의 1계 미분함수(F.O.C.)는 다음과 같다:

$$\rho [P_2(Q_2) + P_2'(Q_2)q_{2i} - g_i C_{2i}'(q_{2i} - e_{2i})] = 0, \dots\dots\dots (4)$$

$$P_1(Q_1) + P_1'(Q_1)q_{1i} - k_i C_{1i}'(q_{1i} - e_{1i}) = 0. \dots\dots\dots (5)$$

식 (4)와 식 (5)에서 구한 q_i 가 기업 i 의 균형 생산량이라고 하면, envelope theorem을 이용하여 기업 i 의 수익함수 $P(Q)q_{1i} - k_i C_{1i}'(q_{1i} - e_{1i}) - \sigma_1(e_{1i} - \epsilon_{1i}) + \rho [P(Q)q_{2i} - g_i C_{2i}'(q_{2i} - e_{2i}) - \sigma_2(e_{2i} - \epsilon_{2i})]$ 를 e_{2i}, e_{1i} 에 대해 각각 미분하고, 기업 j 에 대해서도 같은 방식으로 문제를 해결하면 다음 식을 도출할 수 있다:

$$g_i C_{2i}'(q_{2i} - e_{2i}) = g_j C_{2j}'(q_{2j} - e_{2j}) = \sigma_2, \dots\dots\dots (6)$$

$$k_i C_{1i}'(q_{1i} - e_{1i}) = k_j C_{1j}'(q_{1j} - e_{1j}) = \sigma_1, \dots\dots\dots (7)$$

$$e_{1i} + e_{1j} = \bar{E}_1, \dots\dots\dots (8)$$

$$e_{2i} + e_{2j} = \bar{E}_2. \dots\dots\dots (9)$$

각 기간에 기업 F1과 F2의 배출량은 정부가 목표로 정한 배출량(\bar{E}_1, \bar{E}_2)보다 적거나 동일한 양이어야 하는데, 기업들은 규제기관이 허용하는 최대 배출량까지 배출하는 것이 최적이므로, 각 기간에 기업 F1과 F2의 총 배출량은 \bar{E}_1, \bar{E}_2 와 같아진다. 또한, 1, 2기의 배출 총량은 $\bar{E}_1 + \bar{E}_2 = \bar{E}_t$ 를 만족해야 한다.

기업 i 의 최적 생산량과 배출량 수준에서, envelope theorem을 이용하여 기업 i 의 수익함수를 g_i 와 k_i 에 대해 미분하면 다음과 같은 식을 얻는다:

$$\left| \frac{d\pi_i}{dg_i} \right| = \rho \left[C_2(q_{2i} - e_{2i}) - P_2'(Q_2)q_{2i} \frac{dq_{2j}}{dg_i} + \frac{d\sigma_2}{dg_i}(e_{2i} - \epsilon_{2i}) \right], \dots\dots (10)$$

$$\left| \frac{d\pi_i}{dk_i} \right| = C_1(q_{1i} - e_{1i}) - P_1'(Q_1)q_{1i} \frac{dq_{1j}}{dk_i} + \frac{d\sigma_1}{dk_i}(e_{1i} - \epsilon_{1i}). \dots\dots\dots (11)$$

식 (10)과 식 (11)은 배출권 이월 및 차입이 허용되지 않는 상황에서 과점기업들의 감축기술개발투자는 감축비용(C_1, C_2), 할인계수(ρ), 초기무상할당량(ϵ_1, ϵ_2), 감축기술개발투자가 경쟁기업의 생산량에 미치는 효과($dq_j/dg_i, dq_j/dk_i$), 기술개발투자가 배출권 가격에 미치는 효과($d\sigma_2/dg_i, d\sigma_1/dk_i$) 등과 밀접하게 관계되는 것을 보이고 있다.⁷⁾

식 (11)과 식 (10)의 오른쪽 첫 번째 항은 1, 2기 감축기술개발투자의 직접효과로 감축비용(C_1, C_2)을 나타내기 때문에 항상 양(+의 부호를 가진다. 두 번째 항은 감축기술개발투자가 최종소비재시장에 미치는 간접효과(전략적 효과)이고, 세 번째 항은 배출권시장에 미치는 간접효과(전략적 효과)이다. 식 (11)과 식 (10)의 두 번째 항에서 dq_{2j}/dg_i 와 dq_{1j}/dk_i 는 (-)의 부호를 갖는다. 이것은 감축기술개발투자가 배출권 가격을 낮추어 경쟁기업의 상대적 비용이 낮아져 경쟁기업의 생산량을 증가시키기 때문이다. 반면, 식 (11)과 식 (10)의 세 번째 항에서 $d\sigma_2/dg_i$ 와 $d\sigma_1/dk_i$ 는 양(+의 부호를 갖는데, 이것은 감축기술개발투자로 배출량이 적어져 배출권 가격이 하락되기 때문이다.

기업 i 의 1, 2기의 감축기술개발투자의 총 효과는 다음과 같이 도출된다:

$$\left| \frac{d\pi_i}{dk_i} \right| + \left| \frac{d\pi_i}{dg_i} \right| = C_{1i}(q_{1i} - e_{1i}) - \frac{P'_1 q_{1i} C'_{1i} - C'_{1i} (3P'_1 + 2P''_1 q_{1i})(e_{1i} - \epsilon_{1i})}{2(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i} - k_i C''_{1i})} \dots\dots\dots (12)$$

$$+ \rho \left[C_{2i}(q_{2i} - e_{2i}) - \frac{P'_2 q_{2i} C'_{2i} - C'_{2i} (3P'_2 + 2P''_2 q_{2i})(e_{2i} - \epsilon_{2i})}{2(3P'_2 + 2P''_2 q_{2i} - g_i C''_{2i})} \right].$$

배출권 이월 및 차입이 허용되지 않는 상황에서 1, 2기의 감축기술개발투자효과는 감축비용(C_1, C_2), 할인계수(ρ), 초기무상할당(ϵ_1, ϵ_2), 감축기술개발투자로 인해 발생하는 1, 2기 감축비용감소효과(g, k) 등에 따라 달라진다.

2. 배출권 이월과 감축기술개발

본 절에서는 규제기관이 배출권 이월을 허용하는 경우를 살펴본다. 여기에서는 기업 i 가 1기에 B_i 만큼 추가로 감축하여 2기로 배출권을 이월시킴으로써 2기의 감축목표를 달성하는데 사용할 수 있다. 배출권 이월을 활용하는 경우의 기업 i 수익극대화 문제는

7) $dq_j/dg_i, dq_j/dk_i, d\sigma_2/dg_i, d\sigma_1/dk_i$ 의 도출 과정은 부록 (A1)을 참조하기 바란다.

다음과 같다:

$$\begin{aligned} \text{Max } & P_1 q_{1i} - k_i M_{1i} (q_{1i} - e_{1i} + B_i) - \sigma_1 (e_{1i} - \epsilon_{1i}) \dots\dots\dots (13) \\ & + \rho (P_2 q_{2i} - g_i M_{2i} (q_{2i} - e_{2i}) - \sigma_2 (e_{2i} - B_i - \epsilon_{2i})), \end{aligned}$$

여기서, B_i 는 기업 i 의 배출권 이월분을 나타낸다($0 \leq B_i < \bar{B}$). 기업 i 의 2기 이윤은 할인계수(ρ)가 적용된다. e_{1i}, e_{2i} 와 $\epsilon_{1i}, \epsilon_{2i}$ 는 각각 1, 2기 기업 i 의 배출량과 초기무상할당량을 나타낸다. σ_1, σ_2 는 각각 1, 2기의 배출권 시장가격이다. 기업 i 는 감축기술개발 투자를 통해 1, 2기 감축비용을 각각 $k_i M_{1i}, g_i M_{2i}$, 단 $0 < k_i < 1, 0 < g_i < 1$,으로 감소시킨다. 기업 i 의 감축량(R_i)은 $q_{1i} - e_{1i} + B_i$ 으로, 감축노력 이전의 배출량(q_i)에서 감축노력 이후의 실제 배출량($e_i - B_i$)을 뺀 것이다. 배출권 이월이 허용되지 않는 경우의 감축량 $q_{1i} - e_{1i}$ 과 다르다. 또한, 기업 i 는 2기에 이월된 배출권을 사용할 수 있으므로 배출권 구매량은 $e_{2i} - B_i - \epsilon_{2i}$ 으로, 이월이 허용되지 않는 경우의 구매량 $e_{2i} - \epsilon_{2i}$ 과 그 규모가 다르다.

최종소비재시장에서 기업 i 의 1계 미분조건(F.O.C.)을 구하면 다음과 같다:

$$\rho [P_2(Q_2) + P_2'(Q_2)q_{2i} - g_i M_{2i}'(q_{2i} - e_{2i})] = 0, \dots\dots\dots (14)$$

$$P_1(Q_1) + P_1'(Q_1)q_{1i} - k_i M_{1i}'(q_{1i} - e_{1i} + B_i) = 0. \dots\dots\dots (15)$$

식 (14)과 식 (15)에서 구한 q_i 를 기업 i 의 균형 생산량이라고 하면, envelope theorem을 이용하여 기업 i 의 수익함수 $P_1(Q_1)q_{1i} - k_i M_{1i}(q_{1i} - e_{1i} + B_i) - \sigma_1 (e_{1i} - \epsilon_{1i}) + \rho [P_2(Q_2)q_{2i} - k_i M_{2i}(q_{2i} - e_{2i}) - \sigma_2 (e_{2i} - B_i - \epsilon_{2i})]$ 를 e_{1i}, e_{2i} 로 각각 미분하여 2단계 문제를 해결한다. 기업 j 에 대해서도 같은 방식으로 문제를 해결하면 다음과 같은 식을 도출할 수 있다:

$$g_i M_{2i}'(q_{2i} - e_{2i}) = g_j M_{2j}'(q_{2j} - e_{2j}) = \sigma_2, \dots\dots\dots (16)$$

$$k_i M_{1i}'(q_{1i} - e_{1i} + B_i) = k_j M_{1j}'(q_{1j} - e_{1j} + B_j) = \sigma_1. \dots\dots\dots (17)$$

또한, 최적의 생산량 q_i 가 주어졌을 때, envelope theorem을 이용하여 기업 i 의 이윤함수 $P_1(Q_1)q_{1i} - k_i M_{1i}(q_{1i} - e_{1i} + B_i) - \sigma_1(e_{1i} - \epsilon_{1i}) + \rho[P_2(Q_2)q_{2i} - k_i M_{2i}(q_{2i} - e_{2i}) - \sigma_2(e_{2i} - B_i - \epsilon_{2i})]$ 를 B_i 로 미분하고, 기업 j 에 대해서도 같은 방식으로 문제를 해결하면 다음 식을 도출할 수 있다:

$$k_i M'_{1i}(q_{1i} - e_{1i} + B_i) = k_j M'_{1j}(q_{1j} - e_{1j} + B_j) = \rho \sigma_2. \dots\dots\dots (18)$$

식 (18)은 기업 i 의 1기 한계감축비용이 2기 배출권 가격의 현재가치와 같아질 때까지 배출권 이월이 발생하는 것을 의미한다. 만일 $k_i M'_{1i} < \rho \sigma_2$ 이면, 기업 i 는 1기에 추가적으로 더 감축함으로써 더 많은 이윤을 창출할 수 있고, 반대로 $k_i M'_{1i} > \rho \sigma_2$ 이면 1기의 추가적인 감축은 기업 i 의 손실로 이어진다. 따라서 최적의 이월량(B_i)은 1기 한계감축비용과 2기 배출권 가격의 현재가치가 같을 때 발생한다.

배출권 이월은 기업들에게 기간별 감축비용을 매끄럽게 나누는 유연성을 제공하므로, 배출권 이월전략은 다음과 같은 추가적인 조건들(complementary slackness conditions)을 만족시켜야 한다: 1) $\sigma_1 - \rho \sigma_2 \geq 0$, 2) $0 \leq B_i$, 3) $B_i^* [\sigma_1 - \rho \sigma_2] = 0$.

만일 $\sigma_1 < \rho \sigma_2$ 이면, 참여업체들은 1기에 정부가 허용하는 이월한도까지 배출권을 구입하여 2기에 판매하려는 유인이 있기 때문에 1, 2기의 무차익조건(no arbitrage condition)을 만족시키기 위해서는 $\sigma_1 - \rho \sigma_2 \geq 0$ 이 만족되어야 한다. 이러한 조건은 1기 배출권 가격과 2기 배출권 가격의 현재가치가 같을 때 최적의 이월량이 발생하는 것을 의미한다. 이것은 배출권 이월이 감축비용을 1, 2기에 걸쳐 비용 효과적으로 배분할 수 있는 기회를 제공하므로, 2기 한계감축비용이 1기 한계감축비용보다 높을 때 배출권 이월이 발생하는 것을 함축한다. 만일 $k_i C'_{1i} > \rho g_i C'_{2i}$ 이라고 하면, 기업 i 는 한계감축비용이 상대적으로 높은 1기에 추가적으로 감축하기보다는 한계감축비용이 상대적으로 낮은 2기에 감축하는 것이 더 많은 이익을 가져오기 때문에 이월전략을 활용하지 않는다. 종합하면, $\sigma_1 - \rho \sigma_2 \geq 0$ (무차익조건)과 $k_i M'_{1i}(q_{1i} - e_{1i} + B_i) \leq \rho g_i M'_{2i}(q_{2i} - e_{2i})$ (한계감축비용조건)이 만족되는 경우에 배출권거래제 참여기업들은 배출권 이월제도를 활용할 유인을 갖는다.

배출권 이월이 허용되는 경우에 기업 i 는 1기로부터 이월한 양만큼 2기에 배출량을 늘릴 수 있다. 그러나 이월이 허용되는 경우에도 1, 2기의 배출량은 규제기관이 목표로

하는 전 기간 배출총량(\bar{E}_t)을 초과할 수 없다. 이러한 조건은 다음 식으로 표현된다:

$$e_{2i} + e_{2j} - B_i - B_j = \bar{E}_2, \dots\dots\dots (19)$$

$$e_{1i} + e_{1j} + B_i + B_j = \bar{E}_1, \dots\dots\dots (20)$$

여기서, $\bar{E}_1 + \bar{E}_2 \leq \bar{E}_t$ 이다. 식 (19)과 식 (20)에서는 배출권 이월이 허용되는 경우라도 1, 2기 기업들의 배출총량은 정부가 목표로 정한 총배출량(\bar{E}_t)과 같아야 하는 것을 나타낸다.

기업 i 의 최적 생산량, 배출량, 이월량을 고정한 상태에서, envelope theorem을 이용하여 기업 i 수익함수를 g_i 와 k_i 에 대하여 미분하면 다음 식을 도출할 수 있다:

$$\left| \frac{d\pi_i}{dg_i} \right| = \rho \left[M_2 (q_{2i} - e_{2i}) - P'_2(Q_2) q_{2i} \frac{dq_{2j}}{dg_i} + \frac{d\sigma_2}{dg_i} (e_{2i} - B_i - \epsilon_{2i}) \right], \dots\dots\dots (21)$$

$$\left| \frac{d\pi_i}{dk_i} \right| = M_1 (q_{1i} - e_{1i} + B_i) - P'_1(Q_1) q_{1i} \frac{dq_{1j}}{dk_i} + \frac{d\sigma_1}{dk_i} (e_{1i} - \epsilon_{1i}). \dots\dots\dots (22)$$

식 (21)과 식 (22)의 오른쪽 첫 번째 항은 감축기술개발투자의 직접효과로 감축비용 (M_1, M_2)을 나타내기 때문에 항상 양(+)의 부호를 가진다. 두 번째 항은 감축기술개발투자가 최종소비재시장에 미치는 간접효과이고, 세 번째 항은 배출권시장에 미치는 간접효과이다.⁸⁾ 식 (21)과 식 (22)의 두 번째 항에서 dq_{2j}/dg_i 와 dq_{1j}/dk_i 는 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우와 같은 배경으로 음(-)의 부호를 갖는다. 즉, 감축기술개발투자가 배출권 가격을 낮추어 경쟁기업의 상대적 비용을 감소시켜 경쟁기업의 생산량을 증가시킨다. 또한, $d\sigma_2/dg_i$ 와 $d\sigma_1/dk_i$ 도 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우와 같은 배경으로 양(+)의 부호를 갖는데, 이것은 감축기술개발투자로 배출권 가격이 하락되기 때문이다.

1기와 2기의 감축기술개발투자가 기업 i 의 이윤에 미치는 총 효과는 다음과 같이 도출된다:

8) $dq_j/dg_i, dq_j/dk_i, d\sigma_2/dg_i, d\sigma_1/dk_i$ 의 도출과정은 부록 (A2)을 참조하기 바란다.

$$\left| \frac{d\pi_i}{dk_i} \right| + \left| \frac{d\pi_i}{dg_i} \right| = M_{1i}(q_{1i} - e_{1i} + B_i) - \frac{P'_1 q_{1i} M'_{1i} - M'_{1i} (3P'_1 + 2P''_1 q_{1i})(e_{1i} - \epsilon_{1i})}{2(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i} - k_i M''_{1i})} \quad \cdot (23)$$

$$+ \rho \left[M_{2i}(q_{2i} - e_{2i}) - \frac{P'_2 q_{2i} M'_{2i} - M'_{2i} (3P'_2 + 2P''_2 q_{2i})(e_{2i} - B_i - \epsilon_{2i})}{2(3P'_2 + 2P''_2 q_{2i} - g_i M''_{2i})} \right].$$

식 (23)은 배출권 이월이 허용되는 경우에 발생하는 1, 2기의 감축기술개발투자 효과를 합한 것이다. 1, 2기의 감축기술개발투자효과의 규모는 감축비용(M_1, M_2), 할인계수(ρ), 초기무상할당(ϵ_1, ϵ_2), 1, 2기 감축기술개발투자로 인해 발생하는 감축비용감소효과(g, k) 등의 주요 변수에 의존한다. 식 (23) 오른쪽 첫 번째 항은 감축기술개발투자의 직접효과(+)를 나타내고, 두 번째 항은 최종소비재시장에 미치는 간접효과(-), 그리고 세 번째 항은 배출권시장에 미치는 간접효과(+)이다.

배출권 이월제도는 기업들에게 감축목표를 달성하는 있어 한 가지 감축이행방안이기에 때문에, 기업들은 미래 감축비용 또는 미래 감축기술개발성과 초기무상할당비율 등 미래 변수들을 종합적으로 고려하여 배출권 이월을 할지에 대해 전략적인 선택을 한다. 만일 미래에 감축비용이 급격히 증가되거나 또는 강력한 환경규제수단으로 초기무상할당비율을 현저히 낮출 것으로 예상되는 경우에는 배출권 이월을 전략적으로 선택할 것이다. 반면, 미래 감축비용이 기술진보가 이루어져 현격히 낮아질 것으로 예상되는 경우에는 전략적으로 배출권 이월을 선택하지 않을 것이다. 따라서 배출권 이월이 감축기술개발투자에 미치는 영향은 다음의 정리 1로 요약될 수 있다.

정리 1. 배출권 가격이 $\sigma_1 - \rho\sigma_2 \geq 0$ 를 만족하고, 한계감축비용이 $k_i M'_{1i}(q_{1i} - e_{1i} + B_i) \leq \rho g_i M'_{2i}(q_{2i} - e_{2i})$ 이면, 참여기업들은 배출권 이월전략을 활용할 유인이 있다. 이 경우, $|\frac{\Delta_1^D - \Delta_1^I}{\Delta_2^I - \Delta_2^D}| \geq \rho$ 를 만족하면, 배출권 이월이 허용되는 경우에 기업들의 감축기술개발투자 인센티브는 배출권 이월이 허용되지 않는 경우보다 더 크거나 같다: 여기서, $\Delta_1^D = M_{1i}(q_{1i} - e_{1i} + B_i) - C_{1i}(q_{1i} - e_{1i})$, $\Delta_2^D = M_{2i}(q_{2i} - e_{2i}) - C_{2i}(q_{2i} - e_{2i})$,

$$\Delta_1^I = \frac{P'_1 q_{1i} M'_{1i} - M'_{1i} (3P'_1 + 2P''_1 q_{1i})(e_{1i} - \epsilon_{1i})}{2(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i} - k_i M''_{1i})} - \frac{P'_1 q_{1i} C'_{1i} - C'_{1i} (3P'_1 + 2P''_1 q_{1i})(e_{1i} - \epsilon_{1i})}{2(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i} - k_i C''_{1i})},$$

$$\Delta_2^I = \frac{P_2' q_{2i} M_{2i}' - M_{2i}' (3P_2' + 2P_2'' q_{2i}) (e_{2i} - B_i - \epsilon_{2i})}{2(3P_2' + 2P_2'' q_{2i} - g_i M_{2i}'')} - \frac{P_2' q_{2i} C_{2i}' - C_{2i}' (3P_2' + 2P_2'' q_{2i}) (e_{2i} - \epsilon_{2i})}{2(3P_2' + 2P_2'' q_{2i} - g_i C_{2i}'')}$$

증명: 식 (23)에서 식 (12)을 빼고, 그 차이를 직접효과 차이와 간접효과 차이로 구분하여 정리함으로써 조건식 $\hat{\rho} \geq \rho$, 단 $\hat{\rho} = |(\Delta_1^D - \Delta_1^I) / (\Delta_2^I - \Delta_2^D)|$,를 구할 수 있다. $\hat{\rho} \geq \rho$ 의 조건식은 1기 감축기술개발투자로부터 발생하는 추가적인 이윤이 2기 감축기술개발투자로부터 발생하는 추가적인 이윤의 현재가치보다 더 큰 경우를 나타내고 있다. 이 조건을 만족한다는 것은 이월이 허용되는 경우에 기업들에게 1기의 감축활동이 2기의 감축활동보다 상대적으로 매력적인 전략이기 때문에 감축기술개발에 대한 유인이 더 커지는 것을 의미한다. 즉, $|(\Delta_1^D - \Delta_1^I) / (\Delta_2^I - \Delta_2^D)| \geq \rho$ 의 조건이 만족될 때 기업들은 이월 전략을 통해 더 많은 이윤을 창출할 수 있으며, 이에 따라 감축기술개발투자에 대한 유인은 더 커진다.

정리 1은 이월을 위한 complementary slackness conditions이 포함되어 있다. 식 (18)에서 1단위 이월 배출권을 위한 1기 한계감축비용이 2기 배출권 가격의 현재가치와 같을 때까지 참여기업은 배출권을 이월하려는 유인이 있다는 것을 보이고 있다. 이것은 기업 i 가 1기 감축기술개발투자를 통한 한계감축비용이 2기 감축기술개발투자를 통한 한계감축비용의 현재가치보다 적을 때 1기 감축기술개발투자에 관심을 갖기 때문이다.⁹⁾ 상대적으로 저렴한 한계감축비용으로 추가적인 감축을 이루어 상대적으로 한계감축비용이 높은 2기에 활용할 수 있기 때문에 배출권 이월은 감축기술개발투자를 더 많이 유인한다. 배출권 이월이 기간에 걸쳐 감축비용을 배분하는 역할을 수행함에 따라 기업들의 감축기술개발에 대한 인센티브는 배출권 이월이 가능하지 않을 때보다 더 크거나 적어도 같다.

3. 배출권 차입과 감축기술개발

기업 i 가 2기로부터 배출권을 차입하는 경우에 배출권 차입(B_i)을 반영한 수익극대화 문제는 다음과 같다:

9) 이때 기업 간의 상호 협상에 의해 도달 가능한 배출권 가격과 각 기업들이 선택하는 최적 감축수준에서의 한계감축비용은 정확하게 일치한다. 다만, 부록의 증명에서처럼 기업이 대칭적이라는 전제하에서 $B > 0$ 인 균형에서는 1기에 모든 기업들은 이월을 할 것이므로 배출권 시장에서 거래는 실제로 일어나지는 않을 것이다.

$$\begin{aligned} \text{Max } & P_1 q_{1i} - k_i N_{1i} (q_{1i} - e_{1i}) - \sigma_1 (e_{1i} - B_i - \epsilon_{1i}) \quad \dots\dots\dots (24) \\ & + \rho (P_2 q_{2i} - g_i N_{2i} (q_{2i} - e_{2i} + B_i) - \sigma_2 (e_{2i} - \epsilon_{2i})), \end{aligned}$$

여기서, 1기 배출권 구매비용은 2기로부터 배출권을 차입하기 때문에 1기 배출량 e_{1i} 에서 차입량 B_i 를 감하여 구한다. 반면 2기에는 1기에 차입한 양만큼 더 감축해야 하기 때문에 감축량(R_i)은 감축노력이전의 배출량(q_i)에서 감축노력 이후의 배출량(e_i)를 감한 것에 차입량(B_i)을 합해서 구한다.

3단계인 최종소비재시장에서 기업 i 의 1계 미분조건(F.O.C.)은 다음과 같다:

$$\rho [P_2(Q_2) + P_2'(Q_2)q_{2i} - g_i N_{2i}'(q_{2i} - e_{2i} + B_i)] = 0, \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$P_1(Q_1) + P_1'(Q_1)q_{1i} - k_i N_{1i}'(q_{1i} - e_{1i}) = 0. \quad \dots\dots\dots (26)$$

2단계에서 q_i 를 기업 i 의 균형 생산량이라고 하면, envelope theorem을 이용하여 기업 i 의 수익함수 $P_1(Q_1)q_{1i} - k_i N_{1i}(q_{1i} - e_{1i}) - \sigma_1 (e_{1i} - B_i - \epsilon_{1i}) - \sigma_2 (e_{2i} - \epsilon_{2i})] + \rho [P_2(Q_2)q_{2i} - k_i N_{2i}(q_{2i} - e_{2i} + B_i)]$ 를 e_{1i}, e_{2i} 로 각각 미분하고, 기업 j 에 대해서도 같은 방식으로 문제를 해결하면 다음 식을 도출할 수 있다:

$$g_i N_{2i}'(q_{2i} - e_{2i} + B_i) = g_j N_{2j}'(q_{2j} - e_{2j} + B_j) = \sigma_2, \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$k_i N_{1i}'(q_{1i} - e_{1i}) = k_j N_{1j}'(q_{1j} - e_{1j}) = \sigma_1. \quad \dots\dots\dots (28)$$

또한, 기업 i 의 균형 생산량이 q_i 로 주어졌을 때, envelope theorem을 이용하여, 기업 i 의 수익함수 $P(Q)q_{1i} - k_i N_{1i}(q_{1i} - e_{1i}) - \sigma_1 (e_{1i} - B_i - \epsilon_{1i}) + \rho [P(Q)q_{2i} - k_i N_{2i}(q_{2i} - e_{2i} + B_i) - \sigma_2 (e_{2i} - \epsilon_{2i})]$ 를 B_i 로 미분하고, 기업 j 에 대해서도 같은 방식으로 문제를 해결하면 다음 식을 도출할 수 있다:

$$\rho g_i N_{2i}'(q_{2i} - e_{2i} + B_i) = \rho g_j N_{2j}'(q_{2j} - e_{2j} + B_j) = \sigma_1. \quad \dots\dots\dots (29)$$

식 (29)는 기업 i 의 2기 한계감축비용의 현재가치가 1기 배출권 가격과 같아질 때까지 차입이 이루어지는 것을 의미한다. 만일 $\rho g_i N_{2i}' > \sigma_1$ 이라고 하면, 기업 i 는 더 이상의

추가적인 2기 감축은 손실로 이어지고, 반대로 $\rho g_i N'_{2i} < \sigma_1$ 이라고 하면 추가적인 2기 감축은 더 큰 이익을 창출할 수 있다.

배출권 차입은 이월과 마찬가지로 참여기업들에게 이행년도 간에 감축비용을 스무딩(smoothing)하는 기능이 있다. 따라서 배출권 차입도 추가적인 조건들(complementary slackness conditions)을 충족시켜야 한다: 1) $\sigma_1 - \rho\sigma_2 \leq 0$, 2) $B_i \geq 0$, 3) $B_i^* [\sigma_1 - \rho\sigma_2] = 0$. 만일 $\sigma_1 > \rho\sigma_2$ 이면, 참여기업들은 2기로부터 배출권을 정부가 허용하는 범위 내에서 최대한 차입하여 1기에 판매하려는 유인이 있기 때문에 1, 2기 간의 무차익조건(no arbitrage condition)을 만족시키기 위해서는 $\sigma_1 - \rho\sigma_2 \leq 0$ 이 만족되어야 한다. 이것은 1기 배출권 가격과 2기 배출권 가격의 현재가치가 같아질 때까지 배출권 차입이 발생한다는 것을 의미한다. 결과적으로, 참여기업들은 감축기술개발투자를 통한 2기 한계감축비용의 현재가치가 1기의 한계감축비용보다 낮은 경우에만 차입전략을 활용할 인센티브가 있다. 만일 감축기술개발투자를 통한 2기의 한계감축비용의 현재가치가 1기의 한계감축비용보다 높은 경우($k_i N'_{1i} < \rho g_i N'_{2i}$)라고 하면 배출권 이월에서 언급했듯이 기업 i 는 2기의 감축기술개발투자를 대신하여 1기 감축기술개발에 투자함으로써 감축비용을 1기와 2기에 스무딩(smoothing)은 하는 것이 최적이다. 다시 말해, 배출권 가격과 한계 감축비용이 각각 $\sigma_1 - \rho\sigma_2 \leq 0$ (무차익조건)과 $k_i N'_{1i} (q_{1i} - e_{1i}) \geq \rho g_i N'_{2i} (q_{2i} - e_{2i} + B_i)$ (한계감축비용조건)을 만족하면 참여기업들은 차입 전략을 활용할 유인이 있다.

배출권 차입이 허용되지 않는 경우에 기업 i 와 j 의 배출량은 $e_{1i} + e_{1j} = \bar{E}_1$ 과 $e_{2i} + e_{2j} = \bar{E}_2$ 의 조건을 만족해야 한다. 차입이 허용되는 경우에는 1기의 배출량이 \bar{E}_1 보다 많을 수도 있고, 2기의 배출량이 \bar{E}_2 보다 적을 수도 있다. 그러나 차입이 허용되더라도 1기와 2기의 배출총량은 고정되어 있기 때문에 총배출량은 $\bar{E}_1 + \bar{E}_2 = \bar{E}_t$ 을 만족해야 된다.

$$e_{2i} + e_{2j} + B_i + B_j = \bar{E}_2, \dots\dots\dots(30)$$

$$e_{1i} + e_{1j} - B_i - B_j = \bar{E}_1. \dots\dots\dots(31)$$

여기서, $\bar{E}_1 + \bar{E}_2 = \bar{E}_i$ 이다. 식 (30)은 2기 기업 i 와 j 의 배출량이 허용배출량(\bar{E}_2)에서 차입분이 제외되어야 하는 조건을 보이고, 식 (31)은 1기 기업 i 와 j 의 배출량이 1기 허용배출량(\bar{E}_1)에 차입량을 합해야 하는 조건을 보이고 있다.

기업 i 의 최적 생산량, 배출량, 차입량을 고정하고, envelope theorem을 이용하여, 기업 i 수익함수를 g_i 와 k_i 에 대하여 미분하면 다음과 같다:

$$\left| \frac{d\pi_i}{dg_i} \right| = \rho \left[N_2 (q_{2i} - e_{2i} + B_i) - P_2'(Q_2) q_{2i} \frac{dq_{2j}}{dg_i} + \frac{d\sigma_2}{dg_i} (e_{2i} - \epsilon_{2i}) \right], \dots\dots\dots (32)$$

$$\left| \frac{d\pi_i}{dk_i} \right| = N_1 (q_{1i} - e_{1i}) - P_1'(Q_1) q_{1i} \frac{dq_{1j}}{dk_i} + \frac{d\sigma_1}{dk_i} (e_{1i} - B_i - \epsilon_{1i}). \dots\dots\dots (33)$$

식 (32)와 식 (33)의 오른쪽 첫 번째 항은 감축기술개발의 직접효과로 감축비용 (N_1, N_2)이므로 항상 양(+)의 부호를 가진다. 두 번째 항은 최종소비재시장에서 발생하는 간접효과로써 음(-)의 부호를 가진다.¹⁰⁾ 배출권 차입이 허용되지 않는 경우와 마찬가지로 감축기술개발투자는 배출권 가격을 낮추어 경쟁기업의 비용을 감소시키기 때문에 경쟁기업의 생산량을 증가시킨다. 반면, 세 번째 항은 배출권시장에서 발생하는 간접효과로, 감축기술개발투자로 배출량이 적어지면 배출권 가격이 하락하기 때문에 양(+)의 부호를 갖는다.

1기와 2기의 감축기술개발투자가 기업의 이윤에 미치는 총 효과는 다음과 같이 정리될 수 있다:

$$\left| \frac{d\pi_i}{dk_i} \right| + \left| \frac{d\pi_i}{dg_i} \right| = N_1 (q_{1i} - e_{1i}) - \frac{P_1' q_{1i} N_{1i}' - N_{1i}' (3P_1' + 2P_1'' q_{1i}) (e_{1i} - B_i - \epsilon_{1i})}{2(3P_1' + 2P_1'' q_{1i} - k_i N_{1i}'')} \dots (34)$$

$$+ \rho \left[N_{2i} (q_{2i} - e_{2i} + B_i) - \frac{P_2' q_{2i} N_{2i}' - N_{2i}' (3P_2' + 2P_2'' q_{2i}) (e_{2i} - \epsilon_{2i})}{2(3P_2' + 2P_2'' q_{2i} - g_i N_{2i}'')} \right].$$

식 (34)에 의하면 배출권 차입이 허용되는 경우에 발생하는 감축기술개발투자에 대한 인센티브는 감축비용(N_1, N_2), 초기무상할당(ϵ_1, ϵ_2), 감축기술개발투자로 인해 발생하는 감축비용감소효과(g, k), 그리고 할인계수(ρ) 등의 변수들에 의존한다.

10) $dq_j/dg_i, dq_j/dk_i, d\sigma_2/dg_i, d\sigma_1/dk_i$ 의 도출과정은 부록 (A3)을 참조하기 바란다.

배출권 차입은 기업들의 전략적 감축이행도구이기 때문에 기업들은 미래 감축비용 또는 미래 감축기술개발성과, 초기무상할당비율 등 미래 변수들을 종합적으로 고려한다. 만일 미래에 혁신적인 감축기술개발로 인해 감축비용이 급격히 감소될 것으로 예상되는 경우라면, 기업들은 적극적으로 배출권을 차입할 유인이 있다. 반대로 미래 감축기술개발이 지연되거나 감축비용이 증가될 것으로 예상되는 경우에는 배출권 차입을 활용할 가치를 찾지 못한다. 따라서 배출권 차입이 허용되는 경우에 감축기술개발투자는 다음의 정리 2로 요약될 수 있다.

정리 2. 배출권 가격이 $\sigma_1 - \rho\sigma_2 \leq 0$ 를 만족하고, 한계감축비용이 $k_i N'_{1i}(q_{1i} - e_{1i} + B_i) \geq \rho g_i N'_{2i}(q_{2i} - e_{2i})$ 이면, 참여기업들은 배출권 차입을 활용할 유인이 있다. 이러한 조건과 $|(\Delta_1^H - \Delta_1^{DD})/(\Delta_2^{DD} - \Delta_2^H)| \leq \rho$ 이 만족되면, 배출권 차입이 허용되는 경우에 발생하는 감축기술개발투자에 대한 인센티브는 배출권 차입이 허용되지 않는 경우보다 더 많거나 같다:

$$\text{여기서 } \Delta_1^{DD} = N_1(q_{1i} - e_{1i}) - C_{1i}(q_{1i} - e_{1i}), \Delta_2^{DD} = N_{2i}(q_{2i} - e_{2i} + B_i) - C_{2i}(q_{2i} - e_{2i}),$$

$$\Delta_1^H = \frac{P'_1 q_{1i} N'_{1i} - N'_{1i}(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i})(e_{1i} - B_i - \epsilon_{1i})}{2(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i} - k_i N'_{1i})} - \frac{P'_1 q_{1i} C'_{1i} - C'_{1i}(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i})(e_{1i} - \epsilon_{1i})}{2(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i} - k_i C'_{1i})},$$

$$\Delta_2^H = \frac{P'_2 q_{2i} N'_{2i} - N'_{2i}(3P'_2 + 2P''_2 q_{2i})(e_{2i} - \epsilon_{2i})}{2(3P'_2 + 2P''_2 q_{2i} - g_i N'_{2i})} - \frac{P'_2 q_{2i} C'_{2i} - C'_{2i}(3P'_2 + 2P''_2 q_{2i})(e_{2i} - \epsilon_{2i})}{2(3P'_2 + 2P''_2 q_{2i} - g_i C'_{2i})}.$$

증명: 식 (34)에서 식 (12)을 빼고, 그 차이를 직접효과 차이와 간접효과 차이로 구분하여 정리함으로써 조건식 $\dot{\rho} \leq \rho$ 를 구할 수 있다: $\dot{\rho} = |(\Delta_1^{DD} - \Delta_1^H)/(\Delta_2^H - \Delta_2^{DD})|$. $\dot{\rho} \leq \rho$ 의 조건식은 1기에 감축기술개발투자로부터 발생하는 추가적인 이윤이 2기에 감축기술개발투자로부터 발생하는 추가적인 이윤의 현재가치보다 작은 경우를 나타내고 있다. 이 조건을 만족한다는 것은 차입이 허용되는 경우에 기업 i 의 2기의 감축기술개발투자가 1기의 감축기술개발투자보다 상대적으로 더 많은 추가적인 이윤을 창출한다. 따라서 기업들은 차입전략을 선택할 수 없을 때보다 차입이 허용되는 경우에 감축기술개발투자를 더 많이 할 유인이 생긴다. 즉, $|(\Delta_1^H - \Delta_1^{DD})/(\Delta_2^{DD} - \Delta_2^H)| \leq \rho$ 의 조건이 만족될 때 기업들은 차입 전략을 통해 더 많은 이윤을 창출할 수 있기 때문에 감축기술개발투자에 대한 유인을 더 크게 만든다.

정리 2는 배출권 이월이 발생하는 조건과 정 반대의 경우(complementary slackness conditions)에 배출권 차입이 발생하는 것을 기술하고 있다. 식 (29)에서 2기 한계감축비용의 현재가치가 1기 배출권 가격과 같을 때까지 차입이 발생하는 것을 나타내고 있다. 또한, 2기 감축기술개발투자를 통한 한계감축비용의 현재가치가 1기 감축기술개발투자를 통한 한계감축비용보다 적을 때 2기 감축기술개발투자를 증가할 유인이 있기 때문에 1단위 차입 배출권을 위한 2기 한계감축비용의 현재가치가 1기 한계감축비용과 같을 때까지 차입한다. 배출권 차입을 활용하게 되는 경우 기업들은 2기에 상대적으로 저렴한 한계감축비용으로 추가적인 감축을 이룰 수 있다. 즉, 배출권 차입은 감축비용을 1, 2기에 걸쳐 비용 효과적으로 배분할 수 있기 때문에 감축기술개발투자에 대한 강한 인센티브를 발생시킨다. 따라서 기업들의 감축기술개발에 대한 인센티브는 배출권 차입이 가능하지 않을 때보다 더 크거나 적어도 같아진다.

IV. 시뮬레이션

배출권 이월 및 차입이 허용되는 경우와 허용되지 않는 경우에 과점기업들의 감축기술개발투자 유인 순위를 비교하는 것은 많은 주요 변수들의 상호 관계에 따라 달라질 수 있기 때문에 직관적으로 이해하는 데는 한계가 있다. 이에 따라 특정 수요함수와 비용함수를 가정하고 배출권 이월 및 차입으로 인한 감축기술개발효과를 살펴보기 위해 시뮬레이션을 시도한다.

국내 배출권거래제하에서 무상할당비율은 계획기간에 따라 다르게 설정되어 있다. 제1계획기간('15~'17년)에는 100%, 제2계획기간('18~'20년)에는 97%, 제3계획기간('20~'25년)에는 10% 이하로 무상할당비율을 정하고 있다. 이러한 무상할당비율을 반영하기 위하여 시뮬레이션에서 무상할당비율을 100%, 97%, 90%인 경우로 나누고, 배출권 이월 및 차입의 허용여부에 따른 감축기술개발투자 유인 순위를 비교한다.

과점기업(F1, F2)의 1, 2기 수요함수는 $P(Q) = a - bQ$, 단 $Q = q_1 + q_2$, 이고, 1, 2기 탄소감축비용은 각각 $kC(R_1)^2$, $gC(R_2)^2$, $kM(R_1)^2$, $gM(R_2)^2$, $kN(R_1)^2$, $gN(R_2)^2$ 이다. 여기서 C, M, N 은 각각 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우, 이월이 허용되는 경우, 차입이 허용되는 경우에 발생하는 감축비용함수로, 모든 경우에 동일한 특성을 갖는 함수인 것으로 가정한다. 본 장에서는 대칭적인 균형만을 고려하고 있으므로 주요 변수

들의 하첨자를 생략한다. 감축기술개발에 대한 투자(K, G)가 이루어지지 않는 경우 $k=1$ 과 $g=1$ 이 되고, 감축기술개발에 대한 투자(K, G)가 발생하면 $k=f(K)$, $g=f(G)$, 여기서 $0 < k < 1$, $0 < g < 1$ 이 된다. 단순성을 위해서 1기와 2기의 감축기술 개발투자효과를 각각 $k=1, 0.75, 0.5$, $g=1, 0.75, 0.5$ 으로 고정한다. 모든 시나리오에 할인계수(ρ)는 0.95로 적용한다. 또한, 1, 2기 총배출량을 2단위로 가정하여 각 기업의 배출량(e)이 1단위인 것으로 고정한다. 1, 2기 초기무상할당량은 동일하고($\epsilon_1 = \epsilon_2$), 배출권 이월 및 차입의 최대 상한(\bar{B})은 10%인 것으로 가정한다. 배출권 이월 및 차입을 활용하지 않는 경우에는 $B=0$, 배출권 이월 및 차입을 활용하는 경우에는 최적의 이월 또는 차입은 $0 < B < 1$ 의 범위에서 이루어진다. 최적의 이월 또는 차입은 정리 1과 정리 2에서 제시하고 있는 무차익조건과 한계생산비용조건을 만족시키는 값이다.

〈표 1〉과 〈표 2〉에서는 무상할당수준이 100%, 97%, 90%이고, 1, 2기 감축기술개발 투자효과가 $k=1, 0.75, 0.5$, $g=1, 0.75, 0.5$, $k \neq g$,인 경우에 발생하는 감축기술개발 투자효과를 보이고 있다. 감축기술개발투자가 기업의 이익에 미치는 직접효과는 감축 기술개발비용을 의미하며 항상 양(+)¹⁾의 부호를 가진다. 이러한 감축기술개발투자의 직접 효과는 일반적으로 간접효과보다 크다. 감축기술개발투자는 배출권 가격을 낮추어 경쟁 기업의 생산량을 증가시키는 효과를 가지기 때문에 최종소비재시장에 미치는 간접효과는 음(-)²⁾이다. 반면 감축기술개발투자는 배출권 수요를 감소시키고 배출권 가격을 낮추기 때문에 배출권시장에 미치는 간접효과는 양(+)³⁾이다. 감축기술개발투자가 최종소비재 시장에 미치는 간접효과(-)와 배출권시장에 미치는 간접효과(+)⁴⁾의 크기에 따라서 간접 효과의 부호가 결정된다. 특정 수요함수($P(Q) = a - bQ$, $Q = q_1 + q_2$)를 가정하는 〈표 1〉과 〈표 2〉에서는 간접효과가 음(-)으로 나타나는데, 이것은 감축기술개발투자가 최종소비재 시장에 미치는 간접효과가 배출권시장에 미치는 간접효과보다 크기 때문이다.

〈표 1〉은 일반수요($b=2$)시장을 직면하는 과점기업들이 1기 감축기술개발투자가 2기 감축기술개발투자보다 높은 성과를 올리는 경우($k < g$)를 보이고 있다. 배출권 이월이 허용되는 경우에 기업들은 감축한계비용이 낮은 1기에 더 많은 감축활동을 수행함으로써 잉여 배출권을 2기로 이월하는 유인이 발생한다. 기업들은 배출권 이월을 통해 전 기간의 감축비용을 감소시킬 수 있기 때문에 배출권 이월이 허용되는 경우에 전 기간에 걸친 감축 기술개발투자의 규모가 더 커질 수 있다. 〈표 1〉에서 배출권 이월이 허용되는 경우에 발생하는 감축기술개발효과가 허용되지 않는 경우보다 더 큰 것을 볼 수 있다. 또한, 무상할

당비율이 100%, 97%, 90%로 낮아짐에 따라 감축기술개발효과가 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 유상할당비율이 높아짐에 따라 기업들의 감축의무가 강화되어 감축비용이 높아져 기업들의 감축기술개발에 대한 유인이 더 커지기 때문이다. 종합하면, 유상할당비율이 높아질수록 기간에 걸친 감축비용의 스무딩 효과가 커지기 때문에 배출권 이월이 더 많은 감축기술개발투자를 유인하는 것이다.

〈표 2〉는 1기보다 2기에 감축기술개발성도가 높은 경우($k > g$)를 보이고 있다. 이 경우에는 1기 한계감축비용이 2기보다 높으므로 기업들은 차입을 규제기관이 설정한 10% 범위 이내에서 전략적으로 선택한다. 향후 감축기술개발이 획기적으로 이루어지는 경우에 2기 한계감축비용은 1기보다 낮을 것이며, 이러한 상황을 예상하는 경우에 기업들은 배출권 차입을 전략적으로 추구할 것이다. 배출권 이월과 마찬가지로 기업들은 배출권 차입을 통해 기간 간에 감축비용을 스무딩함으로써 감축비용을 감소시킬 수 있다. 따라서 배출권 차입이 허용될 때 전체적인 감축기술개발투자효과는 더 크게 될 수 있다. 〈표 2〉에서 감축기술개발효과는 배출권 차입이 허용되는 경우에 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한, 무상할당비율이 100%, 97%, 90%로 낮아짐에 따라 전체 감축비용의 규모가 커지게 되어 기업들의 감축기술개발투자에 대한 유인이 더 크게 된다. 이월과 마찬가지로, 유상할당비율이 높아질수록 감축비용의 스무딩 효과로 인해 배출권 차입이 기업들의 감축기술개발투자에 대한 유인을 높인다.

종합하면, 특정 수요함수와 비용함수를 가정하는 본 시뮬레이션에서는 배출권 이월 또는 차입이 허용되는 경우에 기업들의 감축기술개발투자 유인이 더 큰 것을 볼 수 있다. 또한, 〈표 1〉과 〈표 2〉에서는 무상할당비율이 낮아질수록, 즉 환경규제가 강화될수록, 감축기술개발 인센티브가 커지는 것을 볼 수 있다.

표 1 배출권 이월과 감축기술개발 인센티브 I ($k < g, \rho = 0.95$)

정책	a	b	k	g	σ_1	σ_2	B	e1	e2	q1	q2	P1	P2	효과		
														직접	간접	계
100% 무상활당																
No Banking and Borrowing	10	2	0.75	1	0.75	1.07	0	1	1	1.50	1.53	4.00	3.87	0.522	-0.396	0.126
Banking*	10	2	0.75	1	0.75	1.07	0	1	1	1.50	1.53	4.00	3.87	0.522	-0.396	0.126
No Banking and Borrowing	10	2	0.5	0.75	0.53	0.86	0	1	1	1.53	1.57	3.87	3.71	0.597	-0.464	0.133
Banking	10	2	0.5	0.75	0.65	0.88	0.03	0.9	1.1	1.51	1.55	3.95	3.79	0.667	-0.519	0.149
97% 무상활당																
No Banking and Borrowing	10	2	0.75	1	0.75	1.07	0	1	1	1.50	1.53	4.00	3.87	0.522	-0.373	0.149
Banking*	10	2	0.75	1	0.75	1.07	0	1	1	1.50	1.53	4.00	3.87	0.522	-0.373	0.149
No Banking and Borrowing	10	2	0.5	0.75	0.53	0.86	0	1	1	1.53	1.57	3.87	3.71	0.597	-0.437	0.160
Banking	10	2	0.5	0.75	0.65	0.88	0.03	0.9	1.1	1.51	1.55	3.95	3.79	0.667	-0.491	0.177
90% 무상활당																
No Banking and Borrowing	10	2	0.75	1	0.75	1.07	0	1	1	1.50	1.53	4.00	3.87	0.522	-0.318	0.204
Banking*	10	2	0.75	1	0.75	1.07	0	1	1	1.50	1.53	4.00	3.87	0.522	-0.318	0.204
No Banking and Borrowing	10	2	0.5	0.75	0.53	0.86	0	1	1	1.53	1.57	3.87	3.71	0.597	-0.374	0.223
Banking	10	2	0.5	0.75	0.65	0.88	0.03	0.9	1.1	1.51	1.55	3.95	3.79	0.667	-0.426	0.242

주: * 는 배출권 이월 발생하지 않음.

표 2 배출권 차입과 감축기술개발 인센티브 비교 II ($k > g, \rho = 0.95$)

정책	a	b	k	g	σ_1	σ_2	B	e1	e2	q1	q2	P1	P2	효과		
														직접	간접	계
100% 무상활동																
No Banking and Borrowing	10	2	1	0.75	1.00	0.80	0	1	1	1.50	1.53	4.00	3.87	0.520	-0.395	0.126
Borrowing	10	2	1	0.75	0.85	0.89	0.02	1.1	0.9	1.53	1.48	3.90	4.10	0.562	-0.427	0.134
No Banking and Borrowing	10	2	0.75	0.5	0.80	0.57	0	1	1	1.53	1.57	3.87	3.71	0.595	-0.462	0.133
Borrowing	10	2	0.75	0.5	0.68	0.72	0.1	1.1	0.9	1.55	1.51	3.79	3.95	0.750	-0.569	0.181
97% 무상활동																
No Banking and Borrowing	10	2	1	0.75	1.00	0.80	0	1	1	1.50	1.53	4.00	3.87	0.520	-0.371	0.149
Borrowing	10	2	1	0.75	0.85	0.89	0.02	1.1	0.9	1.53	1.48	3.90	4.10	0.562	-0.403	0.158
No Banking and Borrowing	10	2	0.75	0.5	0.80	0.57	0	1	1	1.53	1.57	3.87	3.71	0.595	-0.435	0.160
Borrowing	10	2	0.75	0.5	0.68	0.72	0.1	1.1	0.9	1.55	1.51	3.79	3.95	0.750	-0.540	0.210
90% 무상활동																
No Banking and Borrowing	10	2	1	0.75	1.00	0.80	0	1	1	1.50	1.53	4.00	3.87	0.520	-0.317	0.204
Borrowing	10	2	1	0.75	0.85	0.89	0.02	1.1	0.9	1.53	1.48	3.90	4.10	0.562	-0.347	0.214
No Banking and Borrowing	10	2	0.75	0.5	0.80	0.57	0	1	1	1.53	1.57	3.87	3.71	0.595	-0.373	0.222
Borrowing	10	2	0.75	0.5	0.68	0.72	0.1	1.1	0.9	1.55	1.51	3.79	3.95	0.750	-0.472	0.279

V. 결론

배출권거래제에 참여하는 과점기업들은 감축기술개발을 통해 감축목표를 달성하면서 배출권 이월 또는 차입과 같은 제도적 감축수단을 활용할 수 있다. 미래 감축비용과 배출권 가격에 따라 배출권 이월 및 차입은 현재 또는 미래의 감축기술개발투자를 대체하는 기능을 할 수 있다. 따라서 배출권 이월 및 차입이 허용되는 경우에 참여기업들의 감축기술개발투자에 대한 인센티브가 약화되는지 또는 강화되는지에 대한 평가는 정책 수립에 있어 매우 중요하다. 기존 연구들은 배출권 이월과 감축기술개발투자 유인에 대한 관계를 완전경쟁시장을 토대로 분석하였으며, 그 결과는 경우에 따라 상반되게 나타난다. 반면 본 분석에서는 과점시장을 대상으로 감축기술개발투자에 대한 유인 수준이 이월 및 차입의 허용 여부에 따라 증가하는지를 게임이론모형을 이용하여 분석하였다.

결과를 종합하면, 감축기술개발투자를 통한 1기 한계감축비용이 2기 한계감축비용의 현재가치보다 적거나 같을 때 참여기업들은 배출권 이월제도를 활용할 유인이 있다. 배출권 이월이 감축기술개발투자에 미치는 효과는 감축비용의 규모와 감축기술개발투자가 최종소비재시장과 배출권 시장에 미치는 효과 등에 따라 달라진다. 즉, 감축기술개발투자에 대한 인센티브는 감축비용, 할인계수, 초기무상할당 수준, 감축기술개발투자효과 등에 따라 결정된다. 반대로, 감축기술개발투자를 통한 1기 한계감축비용이 2기 한계감축비용의 현재가치보다 크거나 같을 때에는 참여기업들은 배출권 차입을 활용할 유인이 있다. 감축기술개발투자유인에 영향을 주는 요인은 배출권 이월의 경우와 동일하다. 최종소비재시장과 배출권시장이 완전경쟁시장인 경우에는 감축기술개발투자가 최종소비재시장과 배출권시장에 미치는 간접효과(전략적 효과)가 제거되고 직접효과만이 존재한다. 이것은 무차의조건과 한계감축비용조건을 만족하는 경우에 배출권 이월 또는 차입의 도입 여부에 따른 감축비용(직접효과)의 규모가 감축기술개발투자 유인 순위를 결정하는 것을 의미한다. 즉, 이월 또는 차입의 허용 여부에 따른 1, 2기 직접효과 차이의 상대적 비율과 할인계수의 관계에 따라 이월 또는 차입이 허용되지 않는 경우보다 이월 또는 차입이 허용되는 경우에 더 많은 감축기술개발투자가 발생된다. 1, 2기 감축기술개발의 직접효과 차이의 상대적 비율이 할인계수보다 큰 경우에는 이월이 허용될 때 감축기술개발에 대한 유인이 더 크다. 반대로 1, 2기 직접효과 차이의 상대적 비율이 할인계수보다 작은 경우에는 차입이 허용될 때 감축기술개발에 대한 유인이 더 크게 발생한다.

본 분석에서는 불완전경쟁시장에서 배출권 이월 또는 차입이 감축기술개발투자에 미치는 효과를 분석하였다. 배출권 이월은 초기 이행연도의 감축사업투자를 촉진시킬 수 있다. 그러나 장기적으로 볼 때 이러한 초기감축투자사업이 비용 효과적인지에 대한 평가는 미래 감축기술개발과 밀접하게 관계된다. 이월은 참여기업들이 이행비용을 이행 연도 간에 비용 효과적으로 조절할 수 있도록 유연성을 제공하지만, 미래 기술이 초기 기술개발사업보다 월등히 비용 효과적이라면 초기 감축기술개발투자는 결과적으로 감축 비용을 상승시킬 수 있다.¹¹⁾ 배출권 이월 또는 차입이 허용되는 경우에 배출권거래제 참여기업들은 현재와 미래의 감축기술에 대한 한계감축비용을 비교하여 감축비용이 낮은 시기에 적극적으로 감축기술개발투자를 추진함으로써 전체적인 감축비용을 최소화시킬 수 있다. 구체적으로 말하면, 감축기술개발투자를 통한 미래 한계감축비용의 현재 가치가 현재의 한계감축비용보다 상당한 수준으로 낮아질 것으로 기대되는 경우에는 미래 감축기술개발투자에 중점을 두고 배출권 차입전략을 추진하는 것이 감축비용을 최소화할 수 있다. 반면, 미래 감축의무가 강화되고 배출권 가격이 상승할 것으로 예상되는 경우에는 현재 감축기술개발투자를 적극적으로 이행하고 잉여 배출권을 이월하는 것이 전체적인 감축비용을 줄일 수 있는 최적의 전략이라고 할 수 있다. 기술개발투자는 성공할 확률도 있고 실패할 확률도 존재하나 본 분석에서는 기술개발의 불확실성을 고려하지 않고 있다. 따라서 향후 연구는 감축기술개발투자에 대한 불확실성을 고려하여 배출권 이월 또는 차입이 감축기술개발투자에 미치는 효과를 분석하는데 있다. 미래 불확실성이 존재하는 경우에 배출권 이월 또는 차입이 초기에 더 많은 감축기술개발투자를 유인할 수 있으며 이것은 사회후생에 긍정적으로 또는 부정적으로 영향을 미칠 수 있다.

11) Burtraw and Mansur(1999)는 미국 SO₂ 프로그램에서 배출권 이월이 허용됨으로써 감축이행비용이 상승하게 되었다고 분석하였다. 이것은 SO₂ 배출권거래제 초기에 배출권 이월을 위해 현존 기술 설비 도입이 많이 이루어졌으나 SO₂ 프로그램이 진행되면서 기술진보가 상당한 수준으로 이루어진 결과로 분석하였다. 이러한 결과는 배출권 시장에서의 가격 신호 기능과 더불어 미래 기술개발에 대한 전망이 감축기술개발투자에 상당한 영향을 미칠 수 있다는 점을 함축한다.

참고문헌

- 심성희. 2013. 「배출권거래제 시행에 따른 우리나라 기업의 대응 및 성장전략 연구」. 에너지경제연구원 기본연구보고서.
- Burtraw, Dallas., Erin Mansur. 1999. *The Effects of Trading and Banking in the SO₂ Allowance Market*. Resources for the Future Discussion Paper 99-25. Washington, DC: Resources for the Future.
- Cronshaw, M. B., J. B. Kruse. 1996. "Regulated Firms in Pollution Markets with Banking". *Journal of Regulatory Economics*, 9: 179-189.
- Godby, R.W., S. Mestelman, R. A. Muller., J. D. Welland. 1997. "Emissions Trading with Shares and Coupons when Control over Discharges is Uncertain". *Journal of Environmental Economics and Management*, 32: 359-381.
- Kling, C. L., J. D. Rubin. 1997. "Bankable Permits for the Control of Environmental Pollution," *Journal of Public Economics* 64, 101-115.
- Montero, J. P. 2002a. "Permits, Standards and Technology Innovation". *Journal of Environmental Economics and Management*, 44 : 23-44.
- _____. 2002b. "Market Structure and Environmental Innovation". *Journal of Applied Economics*, 5(2) : 293-325.
- Phaneuf, D. J., T. Requate. 2002. "Incentives for Investment in Advanced Pollution Abatement Technology in Emission Permit Markets with Banking". *Environmental and Resource Economics*, 22: 369-390
- Rubin, J. D. 1996. "A Model of Intertemporal Emission Trading, Banking, and Borrowing". *Journal of Environmental Economics and Management*, 31: 269-286.
- Rubin, J. D., C. L. Kling. 1993. "An Emission Saved is an Emission Earned: An Empirical Study of Emission Banking for Light-Duty Vehicle Manufacturers". *Journal of Environmental Economics and Management*, 25: 257-274.
- Requate, T. 1998. "Does Banking of Permits Improve Welfare?" Draft manuscript, Department of Economics, University of Heidelberg.
- Yates, A., M. B. Cronshaw. 2001. "Pollution Permit Market with Intertemporal Trading and Asymmetric Information". *Journal of Environmental Economics and Management*, 42: 104-118.

부 록

(A1) 배출권 이월 및 차입이 허용되지 않는 경우

1기의 기업 i 와 j 의 1계 미분조건은 다음과 같다:

$$\rho [P(Q) + P' q_{2i} - g_i C'_{2i} (q_{2i} - e_{2i})] = 0, \dots\dots\dots (A1)$$

$$\rho [P(Q) + P' q_{2j} - g_j C'_{2j} (q_{2j} - e_{2j})] = 0, \dots\dots\dots (A2)$$

$$P(Q) + P' q_{1i} - k_i C'_{1i} (q_{1i} - e_{1i}) = 0, \dots\dots\dots (A3)$$

$$P(Q) + P' q_{1j} - k_j C'_{1j} (q_{1j} - e_{1j}) = 0, \dots\dots\dots (A4)$$

$$g_i C'_{2i} (q_{2i} - e_{2i}) = g_j C'_{2j} (q_{2j} - e_{2j}) = \sigma_2, \dots\dots\dots (A5)$$

$$k_i C'_{1i} (q_{1i} - e_{1i}) = k_j C'_{1j} (q_{1j} - e_{1j}) = \sigma_1, \dots\dots\dots (A6)$$

$$e_{1i} + e_{1j} = \bar{E}_1, \dots\dots\dots (A7)$$

$$e_{2i} + e_{2j} = \bar{E}_2. \dots\dots\dots (A8)$$

식 (A1) ~ 식 (A8)을 각각 k_i, g_i 에 대하여 전미분하면 다음과 같다:

$$P' \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_i}{dk_i} + P'' q_i \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) - C'_i - k_i C''_i \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} \right) = 0, \dots\dots (A9)$$

$$P' \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_j}{dk_i} + P'' q_j \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) - k_j C''_j \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A10)$$

$$C'_i + k_i C''_i \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} \right) = k_j C''_j \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A11)$$

$$\frac{de_i}{dk_i} + \frac{de_j}{dk_i} = 0, \dots\dots\dots (A12)$$

$$P' \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) + P' \frac{dq_i}{dg_i} + P'' q_i \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) - C'_{2i} - g_i C''_{2i} \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{de_i}{dg_i} \right) = 0, (A13)$$

$$P' \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) + P' \frac{dq_j}{dg_i} + P'' q_j \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) - g_j C_{2j}'' \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A14)$$

$$C_{2i}' + g_i C_{2i}'' \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{de_i}{dg_i} \right) = g_j C_{2j}'' \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A15)$$

$$\frac{de_{2i}}{dg_i} + \frac{de_{2j}}{dg_i} = 0. \dots\dots\dots (A16)$$

식 (A9)에서 식 (A10)을 뺀 것과 이것을 다시 정리하면 각각 다음과 같다:

$$(P' - k_i C_i'') \frac{dq_i}{dk_i} - C_i' + k_i C_i'' \left(\frac{de_i}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) - (P' - k_j C_j'') \frac{dq_j}{dk_i} = 0, \dots\dots\dots (A17)$$

$$(P' + P'' q_j) \frac{dq_i}{dk_i} + k_j C_j'' \frac{de_j}{dk_i} + (2P' + P'' q_j - k_j C_j'') \frac{dq_j}{dk_i} = 0, \dots\dots\dots (A18)$$

식 (A13)에서 식 (A14)을 뺀 것과 이것을 재정리한 식은 각각 다음과 같다:

$$(P' - g_i C_i'') \frac{dq_i}{dg_i} - C_{2i}' + g_i C_{2i}'' \left(\frac{de_i}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} \right) - (P' - g_j C_{2j}'') \frac{dq_j}{dg_i} = 0, \dots\dots\dots (A19)$$

$$(P' + P'' q_j) \frac{dq_i}{dg_i} + g_j C_{2j}'' \left(\frac{de_j}{dg_i} \right) + (2P' + P'' q_j - g_j C_{2j}'') \frac{dq_j}{dg_i} = 0. \dots\dots\dots (A20)$$

기업 i 와 j 는 대칭적(symmetry)이라는 가정과 식 (A11)과 식 (A12)로부터 다음 식을 도출할 수 있다:

$$\frac{de_{1i}}{dk_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{dq_j}{dk_i} \right) + \frac{C_1'}{2kC_1''}, \dots\dots\dots (A21)$$

$$\frac{de_{1j}}{dk_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{dq_i}{dk_i} \right) - \frac{C_1'}{2kC_1''}. \dots\dots\dots (A22)$$

기업 i 와 j 는 대칭적(symmetry)이라는 가정과 식 (A15)과 식 (A16)로부터 다음 식을 도출할 수 있다.

$$\frac{de_{2i}}{dg_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{dq_j}{dg_i} \right) + \frac{C_2'}{2gC_2''}, \dots\dots\dots (B23)$$

$$\frac{de_{2j}}{dg_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{dq_i}{dg_i} \right) - \frac{C_2'}{2gC_2''}. \dots\dots\dots (B24)$$

식 (A21) ~ 식 (A24)을 이용하면 다음 식들을 도출할 수 있다:

$$\frac{de_i}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} = \left(\frac{dq_{1i}}{dk_i} - \frac{dq_{1j}}{dk_i} \right) + \frac{C_1'}{kC_1''}, \dots\dots\dots (A25)$$

$$\frac{de_{2i}}{dg_i} - \frac{de_{2j}}{dg_i} = \left(\frac{dq_{2i}}{dg_i} - \frac{dq_{2j}}{dg_i} \right) + \frac{C_2'}{gC_2''}. \dots\dots\dots (A26)$$

식 (A25)와 식 (A26)을 각각 식 (A17)과 식 (A19)에 대입하면 $\frac{dq_i}{dk_i} = \frac{dq_j}{dk_i}$ 임을 알 수

있다. 식 (A18)과 식 (A20)으로부터 $\frac{dq_j}{dk_i}$, $\frac{dq_j}{dg_i}$ 를 다음과 같이 도출할 수 있다:

$$\frac{dq_{1j}}{dk_i} = \frac{C_1'}{2(3P_1' + 2P_1''q_1 - kC_1'')}, \dots\dots\dots (A27)$$

$$\frac{dq_{2j}}{dg_i} = \frac{C_2'}{2(3P_2' + 2P_2''q_2 - gC_2'')}. \dots\dots\dots (A28)$$

다음은 감축기술개발투자가 배출권 가격에 미치는 효과($d\sigma/dk$, $d\sigma/dg$)를 살펴본다.

식 (A5)와 식 (A6)을 각각 g_i , k_i 로 전미분하면 다음과 같다:

$$\frac{d\sigma}{dk_i} = C_i' + k_i C_i'' \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} \right) = k_j C_j'' \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right), \dots\dots\dots (A29)$$

$$\frac{d\sigma}{dg_i} = C_i' + g_i C_i'' \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{de_i}{dg_i} \right) = g_j C_j'' \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} \right). \dots\dots\dots (A30)$$

식 (A29)와 식 (A30)에 식 (A22)와 식 (A27), 식 (A24)과 식 (A28)을 이용하여 $d\sigma_1/dk_i$, $d\sigma_2/dg_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\frac{d\sigma_1}{dk_i} = \frac{C_1' (3P_1' + 2P_1'' q_1)}{2(3P_1' + 2P_1'' q_1 - kC_1'')}, \dots\dots\dots (A31)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dg_i} = \frac{C_2' (3P_2' + 2P_2'' q_2)}{2(3P_2' + 2P_2'' q_2 - kC_2'')}. \dots\dots\dots (A32)$$

$P' + P'' q < 0$ 이므로 $d\sigma_1/dk_i > 0$, $d\sigma_2/dg_i > 0$ 이다.

(A2) 배출권 이월이 허용되는 경우

기업 i 와 j 의 1계 미분조건은 다음과 같다:

$$\rho [P(Q) + P' q_{2i} - g_i M_{2i}' (q_{2i} - e_{2i})] = 0, \dots\dots\dots (A33)$$

$$\rho [P(Q) + P' q_{2j} - g_j M_{2j}' (q_{2j} - e_{2j})] = 0, \dots\dots\dots (A34)$$

$$P(Q) + P' q_{1i} - k_i M_{1i}' (q_{1i} - e_{1i} + B_i) = 0, \dots\dots\dots (A35)$$

$$P(Q) + P' q_{1j} - k_j M_{1j}' (q_{1j} - e_{1j} + B_j) = 0, \dots\dots\dots (A36)$$

$$g_i M_{2i}' (q_{2i} - e_{2i}) = g_j M_{2j}' (q_{2j} - e_{2j}) = \sigma_2, \dots\dots\dots (A37)$$

$$k_i M_{1i}' (q_{1i} - e_{1i} + B_i) = k_j M_{1j}' (q_{1j} - e_{1j} + B_j) = \sigma_1, \dots\dots\dots (A38)$$

$$e_{2i} + e_{2j} - B_i - B_j = \bar{E}_2, \dots\dots\dots (A39)$$

$$e_{1i} + e_{1j} + B_i + B_j = \bar{E}_1, \dots\dots\dots (A40)$$

$$-k_i M_{1i}' (q_{1i} - e_{1i} + B_i) + \rho \sigma_2 = 0, \dots\dots\dots (A41)$$

$$B_i + B_j = \bar{B}. \dots\dots\dots (A42)$$

식 (A33)~식 (A42)을 각각 k_i , g_i 에 대하여 전미분하면 다음과 같다:

$$P' \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_i}{dk_i} + P'' q_i \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) - M'_{1i} - k_i M''_{1i} \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} + \frac{dB_i}{dk_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A43)$$

$$P' \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_j}{dk_i} + P'' q_j \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) - k_j M''_{1j} \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} + \frac{dB_j}{dk_i} \right) = 0, \dots (A44)$$

$$M'_{1i} + k_i M''_{1i} \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} + \frac{dB_i}{dk_i} \right) = k_j M''_{1j} \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} + \frac{dB_j}{dk_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A45)$$

$$\frac{de_{1i}}{dk_i} + \frac{de_{1j}}{dk_i} + \frac{dB_i}{dk_i} + \frac{dB_j}{dk_i} = 0. \dots\dots\dots (A46)$$

$$P' \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) + P' \frac{dq_i}{dg_i} + P'' q_i \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) - M'_{2i} - g_i M''_{2i} \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{de_i}{dg_i} \right) = 0, \dots (A47)$$

$$P' \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) + P' \frac{dq_j}{dg_i} + P'' q_j \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) - g_j M''_{2j} \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A48)$$

$$M'_{2i} + g_i M''_{2i} \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{de_i}{dg_i} \right) = g_j M''_{2j} \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A49)$$

$$\frac{de_{2i}}{dg_i} + \frac{de_{2j}}{dg_i} - \frac{dB_i}{dg_i} - \frac{dB_j}{dg_i} = 0, \dots\dots\dots (A50)$$

$$-M'_{1i} - k_i M''_{1i} \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_{1i}}{dk_i} + \frac{dB_i}{dk_i} \right) + \rho \frac{d\sigma_2}{dk_i} = -k_j M''_{1j} \left(\frac{dq_{1j}}{dk_i} - \frac{de_{1j}}{dk_i} + \frac{dB_j}{dk_i} \right) + \rho \frac{d\sigma_2}{dk_i} = 0, \dots\dots (A51)$$

$$\frac{dB_i}{dk_i} + \frac{dB_j}{dk_i} = 0. \dots\dots\dots (A52)$$

식 (A45)과 식 (A51)는 각각 식 (A38)과 식 (A41)를 k_i 에 대하여 전미분한 것이나 두 개의 결과가 같은 것을 알 수 있다.

식 (A43)에서 식 (A44)을 빼고, 재정리한 식은 각각 다음과 같다:

$$(P' - k_i M''_{1i}) \frac{dq_i}{dk_i} - M'_{1i} + k_i M''_{1i} \left(\frac{de_i}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) - k_i M''_{1i} \left(\frac{dB_i}{dk_i} - \frac{dB_j}{dk_i} \right) - (P' - k_j M''_{1j}) \frac{dq_j}{dk_i} = 0, \dots (A53)$$

$$(P' + P'' q_j) \frac{dq_i}{dk_i} + k_j M''_{1j} \left(\frac{de_j}{dk_i} - \frac{dB_j}{dk_i} \right) + (2P' + P'' q_j - k_j M''_{1j}) \frac{dq_j}{dk_i} = 0. \dots\dots\dots (A54)$$

식 (A47)에서 식 (A48)을 빼고, 재정리한 식은 각각 다음과 같다:

$$(P' - g_i M_{2i}'') \frac{dq_i}{dg_i} - M_{2i}' + g_i M_{2i}'' \left(\frac{de_i}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} \right) - (P' - g_j M_{2j}'') \frac{dq_j}{dg_i} = 0, \dots\dots\dots (A55)$$

$$(P' + P'' q_j) \frac{dq_i}{dg_i} + g_j M_{2j}'' \left(\frac{de_j}{dg_i} \right) + (2P' + P'' q_j - g_j M_{2j}'') \frac{dq_j}{dg_i} = 0. \dots\dots\dots (A56)$$

기업 i 와 j 는 대칭적(symmetry)이라는 가정과 식 (A45)과 식 (A46)로부터 다음 식을 도출할 수 있다:

$$\frac{de_{1i}}{dk_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{dq_j}{dk_i} \right) - \frac{dB_j}{dk_i} + \frac{M_{1i}'}{2k_i M_{1i}''}, \dots\dots\dots (A57)$$

$$\frac{de_{1j}}{dk_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{dq_i}{dk_i} \right) - \frac{dB_i}{dk_i} - \frac{M_{1j}'}{2k_j M_{1j}''}. \dots\dots\dots (A58)$$

기업 i 와 j 는 대칭적(symmetry)이라는 가정과 식 (A49)과 식 (A50)로부터 다음 식을 도출할 수 있다:

$$\frac{de_{2i}}{dg_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{dq_j}{dg_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{dB_i}{dg_i} + \frac{dB_j}{dg_i} \right) + \frac{M_{2i}'}{2g_i M_{2i}''}, \dots\dots\dots (A59)$$

$$\frac{de_{2j}}{dg_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{dq_i}{dg_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{dB_j}{dg_i} + \frac{dB_i}{dg_i} \right) - \frac{M_{2j}'}{2g_j M_{2j}''}. \dots\dots\dots (A60)$$

식 (A57) ~ 식 (A60)과 기업 i 와 j 의 대칭성을 이용하면 다음 식들을 도출할 수 있다:

$$\frac{de_{1i}}{dk_i} - \frac{de_{1j}}{dk_i} = \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{dq_j}{dk_i} \right) + \left(\frac{dB_i}{dk_i} - \frac{dB_j}{dk_i} \right) + \frac{M_{1i}'}{k_i M_{1i}''}, \dots\dots\dots (A61)$$

$$\frac{de_{2i}}{dg_i} - \frac{de_{2j}}{dg_i} = \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{dq_j}{dg_i} \right) + \frac{M_{2i}'}{g_i M_{2i}''}. \dots\dots\dots (A62)$$

식 (A61)과 식 (A62)을 각각 식 (A53)과 식 (A55)에 대입하면 $\frac{dq_i}{dk_i} = \frac{dq_j}{dk_i}$, $\frac{dq_i}{dg_i} = \frac{dq_j}{dg_i}$ 임을 알 수 있다.

식 (A54)과 식 (A56)로부터 $\frac{dq_j}{dk_i}$ 과 $\frac{dq_j}{dg_i}$ 를 다음과 같이 도출할 수 있다:

$$\frac{dq_j}{dk_i} = \frac{M'_{1j}}{2(3P' + 2P''q_j - k_i M''_{1j})}, \dots\dots\dots (A63)$$

$$\frac{dq_j}{dg_i} = \frac{M'_{2j}}{2(3P' + 2P''q_j - g_j M''_{2j})}. \dots\dots\dots (A64)$$

다음은 감축기술개발투자가 배출권 가격에 미치는 효과($d\sigma/dk$, $d\sigma/dg$)를 살펴본다. 식 (A37)와 식 (A38)을 각각 g_i , k_i 로 전미분하면 다음과 같다:

$$\frac{d\sigma_1}{dk_i} = M'_i + k_i M''_i \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} + \frac{dB_i}{dk_i} \right) = k_j M''_j \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} + \frac{dB_j}{dk_i} \right), \dots\dots\dots (A65)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dg_i} = M'_i + g_i M''_i \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{de_i}{dg_i} \right) = g_j M''_j \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} \right). \dots\dots\dots (A66)$$

식 (A65)와 식 (A66)에 식 (A58)와 식 (A63), 식 (A60)과 식 (A64)을 이용하여 $d\sigma_1/dk_i$, $d\sigma_2/dg_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\frac{d\sigma_1}{dk_i} = \frac{M'_{1i} (3P'_1 + 2P''_1 q_{1i})}{2(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i} - k_i M''_{1i})}, \dots\dots\dots (A67)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dg_i} = \frac{M'_{2i} (3P'_2 + 2P''_2 q_{2i})}{2(3P'_2 + 2P''_2 q_{2i} - k_i M''_{2i})}. \dots\dots\dots (A68)$$

여기서, $P' + P''q < 0$ 이다. 따라서 $d\sigma_1/dk_i > 0$, $d\sigma_2/dg_i > 0$ 이다.

(A3) 배출권 차입이 허용되는 경우

기업 i 와 j 의 1계 미분조건은 다음과 같다:

$$\rho [P(Q) + P' q_{2i} - g_i N'_{2i} (q_{2i} - e_{2i} + B_i)] = 0, \dots\dots\dots (A69)$$

$$\rho [P(Q) + P' q_{2j} - g_j N'_{2j} (q_{2j} - e_{2j} + B_j)] = 0, \dots\dots\dots (A70)$$

$$P(Q) + P' q_{1i} - k_i N'_{1i} (q_{1i} - e_{1i}) = 0, \dots\dots\dots (A71)$$

$$P(Q) + P' q_{1j} - k_j N'_{1j} (q_{1j} - e_{1j}) = 0, \dots\dots\dots (A72)$$

$$g_i N'_{2i} (q_{2i} - e_{2i} + B_i) = g_j N'_{2j} (q_{2j} - e_{2j} + B_j) = \sigma_2, \dots\dots\dots (A73)$$

$$k_i N'_{1i} (q_{1i} - e_{1i}) = k_j N'_{1j} (q_{1j} - e_{1j}) = \sigma_1, \dots\dots\dots (A74)$$

$$e_{2i} + e_{2j} + B_i + B_j = \bar{E}_2, \dots\dots\dots (A75)$$

$$e_{1i} + e_{1j} - B_i - B_j = \bar{E}_1, \dots\dots\dots (A76)$$

$$\sigma_1 - \rho g_i N'_{2i} (q_{2i} - e_{2i} + B_i) = 0, \dots\dots\dots (A77)$$

$$B_i + B_j = \bar{B}, \dots\dots\dots (A78)$$

식 (A69) ~ 식 (A78)을 각각 k_i , g_i 에 대하여 전미분하면 다음과 같다:

$$P' \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_i}{dk_i} + P'' q_i \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) - N'_{1i} - k_i N''_{1i} \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} \right) = 0, \dots\dots (A79)$$

$$P' \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_j}{dk_i} + P'' q_j \left(\frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) - k_j N''_{1j} \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A80)$$

$$N'_{1i} + k_i N''_{1i} \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} \right) = k_j N''_{1j} \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A81)$$

$$\frac{de_{1i}}{dk_i} + \frac{de_{1j}}{dk_i} - \frac{dB_i}{dk_i} - \frac{dB_j}{dk_i} = 0, \dots\dots\dots (A82)$$

$$P' \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) + P' \frac{dq_i}{dg_i} + P'' q_i \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) - N'_{2i} - g_i N''_{2i} \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{de_i}{dg_i} + \frac{dB_i}{dg_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A83)$$

$$P' \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) + P' \frac{dq_j}{dg_i} + P'' q_j \left(\frac{dq_i}{dg_i} + \frac{dq_j}{dg_i} \right) - g_j N''_{2j} \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} + \frac{dB_j}{dg_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A84)$$

$$N'_{2i} + g_i N''_{2i} \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{de_i}{dg_i} + \frac{dB_i}{dg_i} \right) = g_j N''_{2j} \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} + \frac{dB_j}{dg_i} \right) = 0, \dots\dots\dots (A85)$$

$$\frac{de_{2i}}{dg_i} + \frac{de_{2j}}{dg_i} + \frac{dB_i}{dg_i} + \frac{dB_j}{dg_i} = 0, \dots\dots\dots (A86)$$

$$\frac{d\sigma_1}{dg_i} - \rho \left[N'_{2i} + g_i N''_{2i} \left(\frac{dq_{2i}}{dg_i} - \frac{de_{2i}}{dg_i} \right) \right] = \frac{d\sigma_1}{dg_i} - \rho \left[g_j N''_{2j} \left(\frac{dq_{2j}}{dg_i} - \frac{de_{2j}}{dg_i} \right) \right] = 0, \dots\dots\dots (A87)$$

$$\frac{dB_i}{dg_i} + \frac{dB_j}{dg_i} = 0. \dots\dots\dots (A88)$$

식 (A85)과 식 (A87)는 각각 식 (A73)과 식 (A77)를 g_i 에 대하여 전미분한 것이나 두 개의 결과가 같은 것을 알 수 있다.

식 (A79)에서 식 (A80)을 뺀 결과와 이것을 다시 정리하면 각각 다음과 같다:

$$(P' - k_i N''_{1i}) \frac{dq_i}{dk_i} - N'_{1i} + k_i N''_{1i} \left(\frac{de_i}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) - (P' - k_j N''_{1j}) \frac{dq_j}{dk_i} = 0, \dots\dots\dots (A89)$$

$$(P' + P'' q_j) \frac{dq_i}{dk_i} + k_j N''_{1j} \left(\frac{de_j}{dk_i} \right) + (2P' + P'' q_j - k_j N''_{1j}) \frac{dq_j}{dk_i} = 0. \dots\dots\dots (A90)$$

식 (A83)에서 식 (A84)을 뺀 결과와 이것을 다시 정리하면 각각 다음과 같다:

$$(P' - g_i N''_{2i}) \frac{dq_i}{dg_i} - N'_{2i} + g_i N''_{2i} \left(\frac{de_i}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} \right) - g_i N''_{2i} \left(\frac{dB_i}{dg_i} - \frac{dB_j}{dg_i} \right) - (P' - g_j N''_{2j}) \frac{dq_j}{dg_i} = 0, \dots\dots\dots (A91)$$

$$(P' + P'' q_j) \frac{dq_i}{dg_i} + g_j N''_{2j} \left(\frac{de_j}{dg_i} - \frac{dB_j}{dg_i} \right) + (2P' + P'' q_j - g_j N''_{2j}) \frac{dq_j}{dg_i} = 0, \dots\dots\dots (A92)$$

기업 i 와 j 는 대칭적(symmetry)이라는 가정과 식 (A81)과 식 (A82)으로부터 다음 식을 도출할 수 있다:

$$\frac{de_{1i}}{dk_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{dq_j}{dk_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{dB_i}{dk_i} + \frac{dB_j}{dk_i} \right) + \frac{N'_{1i}}{2k_i N''_{1i}}, \dots\dots\dots (A93)$$

$$\frac{de_{1j}}{dk_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{dq_i}{dk_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{dB_j}{dk_i} + \frac{dB_i}{dk_i} \right) - \frac{N'_{1j}}{2k_j N''_{1j}}. \dots\dots\dots (A94)$$

기업 i 와 j 는 대칭적(symmetry)이라는 가정과 식 (A85)과 식 (A86)로부터 다음 식을 도출할 수 있다:

$$\frac{de_{2i}}{dg_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{dq_j}{dg_i} \right) - \frac{dB_j}{dg_i} + \frac{N'_{2i}}{2g_i N''_{2i}}, \dots\dots\dots (A95)$$

$$\frac{de_{2j}}{dg_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{dq_i}{dg_i} \right) - \frac{dB_i}{dg_i} - \frac{N'_{2j}}{2g_j N''_{2j}}. \dots\dots\dots (A96)$$

식 (A93) ~ 식 (A96)을 이용하여 다음을 도출한다:

$$\frac{de_{1i}}{dk_i} - \frac{de_{1j}}{dk_i} = \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{dq_j}{dk_i} \right) + \frac{N'_{1i}}{k_i N''_{1i}}, \dots\dots\dots (A97)$$

$$\frac{de_{2i}}{dg_i} - \frac{de_{2j}}{dg_i} = \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{dq_j}{dg_i} \right) + \left(\frac{dB_i}{dg_i} - \frac{dB_j}{dg_i} \right) + \frac{N'_{2i}}{g_i N''_{2i}}. \dots\dots\dots (A98)$$

식 (A97)과 식 (A98)을 각각 식 (A89)와 식 (A91)에 대입하면 $\frac{dq_i}{dk_i} = \frac{dq_j}{dk_i}$, $\frac{dq_i}{dg_i} = \frac{dq_j}{dg_i}$ 임을 알 수 있다. 식 (A90)에 식 (A92)를 이용하면 $\frac{dq_j}{dk_i}$, $\frac{dq_j}{dg_i}$ 를 다음과 같이 도출할 수 있다:

$$\frac{dq_j}{dk_i} = \frac{N'_{1i}}{2(3P' + 2P'' q_i - k_i N''_{1i})}, \dots\dots\dots (A99)$$

$$\frac{dq_j}{dg_i} = \frac{N'_{2i}}{2(3P' + 2P''q_i - g_i N''_{2i})} \dots\dots\dots (A100)$$

다음은 감축기술개발투자가 배출권 가격에 미치는 효과($d\sigma/dk$, $d\sigma/dg$)를 살펴본다. 식 (A73)와 식 (A74)을 각각 g_i , k_i 로 전미분하면 다음과 같다:

$$\frac{d\sigma_1}{dk_i} = N'_i + k_i N''_i \left(\frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} \right) = k_j N''_j \left(\frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right), \dots\dots\dots (A101)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dg_i} = N'_i + g_i N''_i \left(\frac{dq_i}{dg_i} - \frac{de_i}{dg_i} + \frac{dB_i}{dg_i} \right) = g_j N''_j \left(\frac{dq_j}{dg_i} - \frac{de_j}{dg_i} + \frac{dB_j}{dg_i} \right), \dots\dots\dots (A102)$$

식 (A101)와 식 (A102)에 식 (A94)와 식 (A99), 식 (A96)과 식 (A100)을 이용하여 $d\sigma_1/dk_i$, $d\sigma_2/dg_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\frac{d\sigma_1}{dk_i} = \frac{N'_{1i} (3P'_1 + 2P''_1 q_{1i})}{2(3P'_1 + 2P''_1 q_{1i} - k_i N''_{1i})}, \dots\dots\dots (A103)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dg_i} = \frac{N'_{2i} (3P'_2 + 2P''_2 q_{2i})}{2(3P'_2 + 2P''_2 q_{2i} - k_i N''_{2i})}. \dots\dots\dots (A104)$$

여기서 $P' + P''q < 0$ 이다. 따라서 $d\sigma_1/dk_i > 0$, $d\sigma_2/dg_i > 0$ 이다.