

탄소배출권거래제도에서의 공급망 조정 모형

민 대기†

이화여자대학교 경영학과

Supply Chain Coordination Under the Cap-and-trade Emissions Regulation

Daiki Min

School of Business Ewha Womans University

This paper considers a supply chain consisting of a manufacturer under the cap-and-trade emissions regulation and a permit supplier. We study joint production quantity and investment in reducing permit production cost decisions for centralized and decentralized supply chains. We formulate two supply chain contracts with aims to coordinate the decentralized supply chain; wholesale price contract and cost-sharing contract. Under the cost-sharing contract, the manufacturer shares a part of the investment in reducing permit production cost and then is allowed to purchase emission permit at a lower price. We analytically find that the proposed cost-sharing contract with reasonable parameters can coordinate the supply chain whereas the wholesale price contract is not desirable to achieve the system-wide profit. Numerical example is followed to support the analysis.

Keywords: Cap-and-trade emissions regulations, Carbon offset, Supply chain coordination, Cost-sharing contract, Investment in cost reduction

1. 서론

우리나라는 지난 2012년 제정된 “온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률 시행령”을 통하여 2015년부터 탄소배출권 거래제도를 본격적으로 시행하고 있다. 탄소배출권거래제도는 환경문제를 시장을 통하여 해결하고자하는 국제적인 접근법인 동시에 기업 경영 관점에서는 탄소배출량이 기업의 수익과 비용에 영향을 주는 새로운 성장 패러다임으로 고려되고 있다. 예를 들어, 울산의 어느 냉매업체는 60억 원의 설비투자를 통하여 획득한 탄소저감 실적을 국제 거래소에 판매함으로써 투자비용을 초과하는 343억 원/년의 수익을 얻을 수 있었다 (Lee, 2009). 이 사례와 같이 적극적 탄소배출량 저감활동을 통한 수익개선을 기대할 수도 있지만 대부분의 국내기업은 탄소배출권거래제도와 관련하여 제조비용 상승에 의한 경쟁력 하락을 우려하고 있다(Hong, 2010).

우리나라는 탄소배출권거래제도의 사전 단계로 “온실가스·에너지 목표관리제”를 시행하고 있으며, 이를 통하여 탄소배출량 측정과 저감을 위한 기업들의 준비를 유도하고 있다. 하지만 현재 탄소 배출량 저감을 위한 우리나라 기업들의 대응 방안은 MRV(Measurement, Reporting, Validation)에 초점을 맞추어 인벤토리 구축을 통한 배출원 관리와 시설 및 공정개선을 통한 탄소저감 활동에 집중하고 있다(<Table 1> 참조). 에너지 효율이 높은 설비도입과 친환경 원료 대체 등 탄소 배출량 저감을 위한 기업의 독립적인 투자와 개선노력도 중요하지만, 이와 같은 대응전략이 기업 경영 관점에서 탄소배출권거래제도에 대한 효과적인 대응 전략인지는 의문시된다.

탄소배출권거래제도 대상 기업은 배출허용량 초과분에 대하여 일반적으로 거래 시장에서 배출권을 구매하거나 자체적인 감축 활동을 통하여 대응하게 된다. 이와 같은 일반적인 거래제도에 더하여 상쇄제도(carbon offset)는 기업 간 직접적 거

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2014S1A5A8013907).

† 연락처 : 민대기 교수, 120-750 서울시 서대문구 이화여대길 52 이화여자대학교 경영학과, Tel : 02-3277-3923, Fax : 02-3277-2835,

E-mail : dmin@ewha.ac.kr

2015년 2월 9일 접수; 2015년 4월 21일 수정본 접수; 2015년 5월 10일 게재 확정.

Table 1. Review of plans for the cap-and-trade emissions regulations in Korea

대응 방안	사내 배출원 관리	인증 획득	협력사 지원	물류망 재구성	친환경 인프라
설명	인벤토리 관리시스템 개발 및 운영	탄소성적표시제, CDM (청정개발체계) 등	배출원 관리 지원	순로최적화, 공동배송, Modal shift 등	공정개선, 연료대체, 포장재/원료 개선
업체 수 (비율, %)	30 (100%)	22 (73.33%)	4 (13.33%)	15 (50%)	26 (86.67%)

출처 : 탄소경영보고서, 지속가능경영보고서 등을 통하여 공시된 기업들의 대응 방안을 자체적으로 조사함
30개 기업을 조사하였으며 비율은 30개 업체 중 해당 대응방안을 선택한 업체의 수를 의미함

래를 통한 배출권 확보를 허용하고 있다. 상쇄제도에서 거래제도 대상 기업은 협의매매를 통하여 거래제도 대상이 아닌 기업의 감축실적을 배출권으로 구매하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 탄소배출권거래제도의 제약을 받는 제조업체와 배출권 공급업체로 구성된 공급망에서 두 참여 기업 사이에 상쇄제도를 통한 배출권 거래가 발생하는 경우 공급망 조정 과정을 통하여 탄소배출권거래제도에 효과적으로 대응하는 것이 가능함을 이론적으로 검토하고자 한다. 여기서 공급망 조정은 공급망 참여 기업들의 수익을 극대화하면서 위험을 회피하기 위한 경영전략을 의미하는데 과거 많은 사례와 연구를 통하여 그 효과성이 제시되었다(Cachon, 2003). 특히 본 논문에서는 선행연구에서 많이 고려한 도매가 계약에 더하여 배출권 공급업체의 비용을 제조업체가 일부 공유하는 비용 공유 계약의 효과를 분석하고자 한다.

2. 문헌 연구

공급망의 단계별 탄소배출량 산정 연구는 저탄소 공급망의 설계 및 운영을 위한 기반을 제시한다. 배출량 측정과 관리를 위하여 기업들은 IPCC 가이드라인과 GHG Protocol 방법론을 이용하여 탄소 인벤토리 관리를 하고 있다. 탄소발자국은 한 개의 제품을 최종 소비자에게 전달하는 과정에서 발생하는 탄소배출량을 의미하는데, 이와 관련한 연구가 다수 진행되고 있다. Cholette and Venkat(2009)와 Rizet *et al.*(2012)은 각각 미국의 와인 유통망과 유럽지역의 소비재 상품을 대상으로 탄소발자국을 측정 한 사례를 분석하였으며, McKinnon and Piecyk(2009)는 육로운송과정에 초점을 맞추어 탄소배출량 측정 방법론과 실증연구를 수행하였다.

탄소배출량 측정에 더하여 공급망 운영 형태에 따라 탄소배출량이 달라질 수 있음을 확인한 연구가 존재한다. 재고 집중화 전략과 관련하여 Kohn and Brodin(2008)은 문헌연구와 사례연구를 통하여 재고 집중화(centralization)를 이용하는 경우 수송거리의 증가에 따라 탄소 배출량이 증가함을 제시하였다. 하지만 Ballot and Fontane(2010)는 앞서 Kohn and Brodin(2008)의 연구결과와 달리 사례분석을 통해 수송수단을 적절하게 선택함으로써 탄소 배출량을 줄일 수 있음을 제시하였다. 연구

결과에 차이가 존재하지만 공급망 운영방식이 탄소배출량과 밀접한 관계에 있으며 그 영향이 매우 크다는 것을 확인할 수 있다.

사례/문헌 연구가 아닌 이론적 접근 측면에서 탄소배출량을 고려한 공급망 및 운영관리 연구는 공급망 계획, 물류계획, EOQ/Newsvendor 모형 등 재고모형의 확장 방향으로 진행되었다. 일부 연구는 선형계획법(linear programming)을 이용하여 공급망 모형에 탄소 배출량 제약과 거래비용을 반영하고 그 영향을 수치 실험(numerical experiments)을 통하여 평가하였다(Benjaapar *et al.*, 2010; Chaabane *et al.*, 2012; Giarola *et al.*, 2012). Merrick and Bookbinder(2010)는 탄소 배출량을 고려하여 다빈도 소량수송과 소빈도 대량수송의 두 가지 수송정책(dispatch policy)을 비교하였는데, 시뮬레이션 연구를 통하여 공급망 비용과 탄소배출량을 동시에 감소시키기 위한 조건을 제시하였다. Hoen *et al.*(2012)은 Newsvendor 모형을 확장하여 총 비용을 최소화하는 최적 수송대안 선택 문제를 다루었다. 하지만 대부분의 연구에서는 탄소배출권의 거래에 따른 비용과 수익의 발생을 고려하는 대신에 직접적으로 탄소배출량을 제한하는 것을 고려하였다.

운영비용과 탄소배출 비용을 고려한 주문량 결정은 전통적인 EOQ 모형을 확장하여 제시되었다. Benjaafar *et al.*(2010)과 Chen *et al.*(2011)은 EOQ 모형에 탄소배출량 제약을 적용한 모형을 제안하고 주문량 조정을 통하여 탄소배출량과 EOQ 비용을 동시에 감소시키기 위한 조건을 분석하였다. Hua *et al.*(2011)은 탄소배출권거래제에 따른 거래비용을 제약식과 목적함수에 포함한 새로운 EOQ 모형을 제시하여 탄소거래 비용을 고려한 최적 주문량을 도출하였다. Toptal *et al.*(2014)은 Hua *et al.*(2011)의 모형을 확장하여 자체적인 탄소저감을 위한 비용 투자를 EOQ 모형과 함께 고려하였다. Zhang and Xu(2012)는 다수 제품 모형을 대상으로 하는 확장모형을 제시하였는데, Newsvendor 모형을 기반으로 단일기간의 수요 불확실성을 함께 고려하였다. EOQ 기반 모형의 경우 공급망에서 기업 간 관계를 고려하지 못하는 단점이 있다. 또한 일부 연구의 경우 구매에 따른 탄소배출량(일반적으로 Scope 3로 기업 배출량으로 고려하지 않음)을 연구 모형에는 포함하는 등 실제 산업의 탄소배출권거래제도를 제대로 반영하지 못하고 있다.

Plambeck(2012)는 문헌연구를 통하여 탄소배출권거래제도

에 효과적으로 대응함에 있어 공급망 관리와 운영관리 측면에서의 접근법을 체계적으로 구분하여 제시하였다. 예를 들어, 리드타임(lead-time)의 변동성이 증가함으로써 운영비용과 함께 탄소배출량 또한 증가하므로, 채찍효과(Bullwhip effect) 완화를 위한 공급망 관리 전략을 통하여 운영비용과 탄소배출량을 동시에 개선하는 것이 가능하다(Arikan *et al.*, 2014).

Plambeck(2012)에서 제시한바와 같이 최근에는 단일 기업을 대상으로 하는 것에서 확장하여 공급망 참여 기업들 사이의 협력 과정을 통하여 탄소배출 비용을 극복하고자 하는 연구가 시작되고 있다. Du *et al.*(2013)은 제조업체와 공급업체로 구성된 공급망에서 탄소배출권거래제도에 의하여 공급망 참여자들 사이에 이익의 불균형이 발생할 수 있음을 제시하였는데, 탄소배출 허용량이 완화될수록 제조업체의 이익은 증가하지만 배출권 공급업체의 이익은 감소함을 확인하였다. Swami and Shah(2013)는 통합 공급망의 총이익이 분산 공급망의 총이익보다 증가하며, 이부제 요금 계약(two-part tariff contract)을 이용한 공급망 조정 가능성을 제시하였다. 하지만 Swami and Shah(2013)의 경우 저탄소 노력과 가격에 선형적으로 증감하는 확정 수요를 가정하였다. Dong *et al.*(2014)는 탄소배출권거래제도에 의하여 제조업체의 이익은 감소하고 소매업체의 이익은 증가하는 결과를 도출하였는데, 이익 공유 계약을 통하여 이와 같은 이익 불균형을 조정하는 것이 가능함을 제시하였다.

문헌연구 결과 공급망 관리와 관련한 탄소배출권거래제도의 연구 동향을 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 대다수의 연구가 사례 또는 문헌 연구를 통하여 공급망에서 탄소배출량 측정을 위한 체계와 방법론 정립에 머무르고 있으며, 탄소배출량 측정 결과를 활용하여 탄소저감을 위한 공급망 관리 관점에서의 대안을 제시하지 못하고 있다. 둘째, 공급망 관점에서 탄소배출권거래제도에 대한 기업 대응 전략과 관련한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 예를 들어, 우리나라에서 시행하는 탄소배출권거래제도는 협력사 또는 배출권 공급업체의 탄소배출량 저감 실적을 인정하는 제도를 갖고 있으나 이와 같은 제도의 효과를 공급망 운영 측면에서 검토한 논문은 미흡하다. 따라서 공급망 참여 기업 간 협업과 조정을 통하여 탄소배출권 거래제도에 대응하기 위한 방안을 수립하는 것은 그 의의가 높다고 할 수 있다.

3. 모형 및 분석

본 논문에서는 제조업체와 탄소배출권 공급업체로 구성된 공급망을 대상으로 탄소배출권 공급업체가 선도자(leader)이고 제조업체가 추종자(follower)인 Stackelberg 게임을 구성하였다. <Table 2>는 본 논문에서 사용한 기호를 요약한 표이다.

제조업체는 단일 기간 동안 발생하는 불확실한 수요에 대하여 생산량 x 를 결정해야 한다. 이때 확률적 수요는 누적확

률분포 $F(D)$ 에 의하여 결정되며, $F(D)$ 는 수요에 대하여 단조증가 함수(monotone increasing function)이다. 본 논문에서는 분석을 용이성 측면에서 수요함수를 정규분포로 가정하였다. 불확실한 수요에 대한 생산량 결정과 같은 제조업체의 의사결정 문제는 판매이익과 과잉재고 비용을 고려한 Newsvendor 모형으로 나타낼 수 있다.

제조업체는 온실가스 배출권거래제도(cap and trade)의 제약을 받으며, 제조업체의 온실가스 총배출량에 제한을 받는다. 단위생산량에 대한 배출계수 e 를 고려한 제조업체의 총 배출량 ex 가 배출허용량(emission cap) K 를 초과하는 경우에 제조업체는 부족한 배출권 $(ex - K)^+$ 을 배출권 공급업체로부터 협의매매를 통하여 구매해야 한다. 반대로 총 배출량이 배출허용량 보다 작은 경우 잉여분 $(ex - K)^-$ 의 판매를 통하여 추가적인 이익획득이 가능하다. 따라서 제조업체는 판매이익과 과잉재고 비용에 더하여 탄소배출권 거래비용을 고려하여 최적의 생산량을 결정하는 것이 필요하다. 여기서 제조업체와 배출권 공급업체 사이의 배출권 거래비용 w 는 확정적(deterministic) 값으로 고려하였다. 본 논문에서 고려하고 있는 협의매매에 의한 상쇄제도에서 배출권거래제 대상 기업(즉, 제조업체)은 특정 배출권 공급업체와 협의를 통하여 거래계약을 체결하는 것이 가능하며, 이 경우 배출권 거래가격을 일반적인 시장거래와 달리 고정된 형태로 처리하는 것이 가능하다. 마지막으로 배출허용량 K 는 배출권거래제도를 통제하는 정부가 정책적으로 사전에 할당한 것으로 고려하였다.

Table 2. Notation summary

기호	설명
x	제조업체의 생산량(개)
p	제조업체 판매가격(원/개)
h	제조업체 생산비용(원/개)
w	배출권 거래비용(원/kgCO ₂)
c	배출권 생산비용(원/kgCO ₂), $c \leq c \leq c_0$
e	배출계수(kgCO ₂ /개)
K	제조업체의 배출허용량(kgCO ₂)

배출허용량을 초과하는 제조업체의 탄소배출량은 탄소배출권 공급업체가 거래가격 w 에 제공하며, 공급업체가 배출권을 생산하는데 소요되는 비용은 c 이다. 앞서 서론에서 제시한 바와 같이 기업은 설비투자를 통하여 추가적인 탄소저감 실적을 획득하거나 에너지 효율을 향상시키는 것이 가능하다. 본 논문에서는 기업의 이와 같은 투자활동을 고려하여 비용 투자를 통한 배출권 생산비용 저감을 고려하였다. Jiang and Klabjan(2012)는 배출권 제약을 받는 단일 제조업체의 배출계수 개선을 위한 비용투자 모형을 제시하였는데, 본 논문에서는 Jiang and Klabjan(2012)의 모형을 참고하여 배출권 생산비용을 c_0 에서 c 로 저감하는데 소요되는 추가적인 비용 함수를 $g(c) = \alpha(c_0 - c)$ 와 같

은 선형함수로 가정하였다. 여기서 α 는 단위 생산비용 저감을 위한 투자비용 계수이며, 배출권 생산비용에 총 투자비용 $g(c)$ 는 반비례한다. 마지막으로 배출권 생산비용은 최대 \underline{c} 까지 저감 가능한 것으로 가정하였다(즉, $\underline{c} \leq c \leq c_o$).

3.1 중앙집중 모형(Centralized Supply Chain)

이 번 장에서는 통합된 공급망을 단일한 의사결정자가 중앙 집중적으로 관리하여 공급망 전체의 이익을 극대화하는 경우를 고려하였다. 통합된 공급망의 총 이익은 제조업체의 판매이익과 과잉재고비용, 탄소배출권 생산비용 및 배출권 생산비용 저감을 위한 투자비용 등으로 구성된다. 일반적으로 Newsvendor 모형에서 포함하는 재고부족에 의하여 발생할 수 있는 매출손실은 본 논문의 결과에 영향을 주지 않으므로 모형의 단순화를 위하여 포함하지 않았다.

통합 공급망에서는 제조업체와 배출권 공급업체를 단일 기업으로 고려하며, 따라서 제조업체와 공급업체 사이의 배출권 거래는 명시적으로 고려되지 않는다(즉, 배출권 공급업체의 판매이익과 제조업체의 구매 비용이 일치). 배출권 거래를 명시적으로 고려하지 않으므로 거래에 의한 공급업체의 이익과 제조업체의 구매비용은 모형에 포함되지 않는다. 통합 공급망의 총 이익 π 는 다음 식 (1)과 같다.

$$\pi(x, c) = (p-h)x - pE(x-D)^+ - c(ex-K) - g(c), \quad \underline{c} \leq c \leq c_o, x \geq 0 \quad (1)$$

Proposition 1 : 통합 공급망의 최적 생산량과 배출권 생산비용 (x^*, c^*) 은 다음과 같다.

$$\text{i) } x^* = F^{-1}\left(\frac{p-h-c^*e}{p}\right)$$

$$\text{ii) } c^* = \begin{cases} c_o & \hat{c} \leq \underline{c} \\ \operatorname{argmax}_{c \in \underline{c}, c_o} \pi(x^o, c) & \underline{c} \leq \hat{c} \leq c_o \\ \underline{c} & \hat{c} \geq c_o \end{cases}$$

여기서 $x^o = F^{-1}\left(\frac{p-h-ce}{p}\right)$, \hat{c} 은 $\frac{\partial \pi(x^o, c)}{\partial c} = 0$ 를 만족하는 c 값을 의미한다.

Proof : c 가 주어진 경우 $\pi(x, c)$ 는 제조업체 생산량 x 에 대하여 오목함수(concave function)이므로, 제조업체의 최적 생산량은 식 (1)에 제시된 $\pi(x, c)$ 의 1차 최적조건(first order optimality condition), $\frac{\partial \pi}{\partial x} = 0$ 을 이용하여 결정된다.

$$\frac{\partial \pi}{\partial x} = p-h-pF(x) - ce = 0 \Leftrightarrow x^o = F^{-1}\left(\frac{p-h-ce}{p}\right) \quad (2)$$

다음으로 x^o 를 식 (1)에 대입하여 얻은 함수 $\pi(x^o, c)$ 를 이용하여 c^* 를 계산하기 위하여 우선 c 에 대한 함수 $\pi(x^o, c)$ 의 특성을 분석하도록 한다. $\frac{\partial^2 \pi(x^o, c)}{\partial c^2} = \frac{e^2}{pf(x^o)} > 0$ 이므로 $\frac{\partial \pi(x^o, c)}{\partial c}$ 는 c 에 대하여 증가함수(increasing function)이고, 함수 $\pi(x^o, c)$ 의 볼록성(convexity)이 증명된다. 따라서 최적 배출권 생산비용 c^* 를 결정하기 위하여 $\pi(x^o, c)$ 의 1차 최적조건(즉, $\frac{\partial \pi(x^o, c)}{\partial c} = 0$)과 $\underline{c} \leq c \leq c_o$ 의 범위를 고려하여 결정된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi(x^o)}{\partial c} &= (p-h) \frac{\partial x^o}{\partial c} - (p-h-ce) \frac{\partial x^o}{\partial c} \\ &\quad - (ex^o - K) - ce \frac{\partial x^o}{\partial c} - \frac{\partial g(c)}{\partial c} \\ &= -ex^o + K + \alpha \\ &= -eF^{-1}\left(\frac{p-h-ce}{p}\right) + K + \alpha \end{aligned}$$

따라서 $\frac{\partial \pi(x^o, c)}{\partial c} = 0$ 을 만족하는 c 는 $\hat{c} = \frac{p}{e} \left[1 - F\left(\frac{K+\alpha}{e}\right)\right] - \frac{h}{e}$ 이고, 최적의 배출권 생산비용은 \hat{c} 과 c 의 범위를 고려하여 다음과 같이 결정된다.

- i) $\hat{c} \leq \underline{c} \Rightarrow \frac{\partial \pi(x^o, c)}{\partial c} > 0$ 인 경우에 c 에 대해서 이익이 증가하므로 $c^* = c_o$
- ii) $\hat{c} \geq c_o \Rightarrow \frac{\partial \pi(x^o, c)}{\partial c} < 0$ 인 경우에 c 에 대해서 이익이 감소하므로 $c^* = \underline{c}$
- iii) $\underline{c} < \hat{c} < c_o$ 인 경우에 $\pi(x^o, c)$ 는 오목함수 이므로, $c^* = \operatorname{argmax}_c \{\pi(x^o, c_o), \pi(x^o, \underline{c})\}$.

최적의 배출권 생산비용 c^* 를 식 (2)에 대입하여 제조업체의 최적 생산량 x^* 를 결정한다. \square

최적의 배출권 생산비용이 초기값보다 작은 조건($c^* < c_o$)을 만족하는 경우 배출권 생산비용 저감을 위한 비용투자가 이루어짐을 의미한다. Proposition 1의 결과를 살펴보면 통합 공급망에서 배출권 생산비용 저감을 위한 투자가 이루어지기 위한 필요조건은 $c_o \leq \hat{c}$ 임을 알 수 있다. 여기서 $\hat{c} = \frac{p}{e} \left[1 - F\left(\frac{K+\alpha}{e}\right)\right] - \frac{h}{e}$ 이므로 다음 관계가 성립한다.

$$c_o \leq \hat{c} \Leftrightarrow ec_o \leq p \left[1 - F\left(\frac{K+\alpha}{e}\right)\right] - h \leq p \left[1 - F\left(\frac{K}{e}\right)\right] - h \quad (3)$$

K/e 는 배출허용량과 동일한 수준의 생산량이므로, $p \left[1 - F\left(\frac{K}{e}\right)\right] - h$ 는 배출허용량을 초과해서 생산하는 경우 추가로 받

생하는 기대이익이 되며, ec_0 는 초기 배출권 생산비용을 고려한 단위 배출권 비용이 된다. 즉, 공급망에서 배출권 생산비용보다 배출 허용량을 초과한 추가 생산을 통해 이익이 기대되는 경우에 배출권 생산비용 저감을 위한 비용투자가 발생하게 된다.

배출권 생산비용 저감을 위한 비용투자 결정은 다음 식 (4)와 같이 \hat{c} 를 활용한 역치 형태의 규칙(threshold type rule)으로 표현할 수 있다.

$$c^* = \begin{cases} \frac{c}{c_0} & c \leq \hat{c} \\ \text{otherwise.} & \end{cases} \quad (4)$$

배출권 생산비용이 \hat{c} 보다 작은 경우 비용투자가 이루어지며, 반대의 경우 비용투자 없이 초기 생산비용을 이용한다. $\hat{c} = \frac{p}{e} [1 - F(\frac{K+\alpha}{e})] - \frac{h}{e}$ 에서 제시된 바와 같이 제품의 판매가격이 증가하거나 배출 허용량, 제품 생산비용 등이 감소함에 따라 배출권 생산비용 저감을 위한 비용투자가 이루어질 가능성이 증가한다.

Proposition 2 : 제조업체의 생산량은 배출권 생산비용에 반비례한다.

Proof : $\frac{\partial x^*}{\partial c} = \frac{\partial F(x^*)}{\partial c} \frac{1}{\partial F(x^*)/\partial x^*} = -\frac{e}{p} \frac{1}{f(x^*)} < 0$ 이므로, 제조업체의 최적 생산량이 배출권 생산비용에 대하여 감소한다. □

Proposition 3 : 제조업체의 배출허용량이 $[0, ex^*] = [0, eF^{-1}(\frac{p-h-ce}{p})]$ 의 범위에 있는 경우 제조업체와 배출권 공급업체 사이의 조정 과정을 통하여 제조업체 생산량과 공급망의 이익을 증가시키는 것이 가능하다.

Proof : 제조업체에 할당된 배출허용량을 초과하지 않는 수준에서 최대 생산량은 K/e 와 같다.

$$\Delta\pi = \pi(K/e, c) - \pi(x^*, c) = (p-h)\left(\frac{K}{e} - x^*\right) + c(ex^* - K) - p\left\{\int_0^{K/e} dF(D) - \int_0^{x^*} dF(D)\right\}$$

평균값 정리(Mean value theorem)에 의하여 $\frac{K}{e} \leq y \leq x^*$ 를 만족하는 모든 y 에 대하여 $\int_0^{K/e} dF(D) - \int_0^{x^*} dF(D) = F(y) - F(x^*)$ 이 성립하며, 이를 적용하여 $\Delta\pi$ 를 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta\pi = \frac{1}{e} \{p-h-ce-pF(y)\}(K-ex^*), \frac{K}{e} \leq y \leq x^*.$$

$p-h-ce-pF(x^*)=0$ 이고, $F(y)$ 는 y 에 대하여 단조증가(monotone increasing)하는 함수이므로 $y \leq x^*$ 이면 $p-h-ce-pF(y) \geq 0$ 이 성립한다. 따라서 $K > ex^*$ 인 경우 $\Delta\pi > 0$ 이 성립하므로, 제조업체는 배출허용량을 초과하지 않는 범위에서 생산량을 결정하게 되며, 배출권 공급업체의 이익은 언제나 0이 된다. 반대로 $K \in [0, ex^*]$ 이면 $\Delta\pi \leq 0$ 이 성립한다. 따라서 제조업체 생산량은 배출허용량을 초과하는 수준으로 증가하며, 이 경우 공급업체와의 조정과정을 통하여 공급망의 이익을 증가시키는 것이 가능하다. □

Proposition 3는 배출 허용량이 충분하지 않은 경우에 제조업체와 배출권 공급업체 사이의 조정 과정을 통해서 공급망 이익의 개선 가능성이 존재함을 제시한다. 본 논문에서는 Proposition 3에서 제시한 조건 아래에서 분산 공급망을 대상으로 도매가 계약과 비용 공유 계약을 이용한 공급망 조정과 공급망 이익 개선의 가능성을 살펴보도록 한다.

3.2 분산 모형; 도매가 계약(Decentralized Supply Chain; Wholesale Price Contract)

제조업체와 배출권 공급업체가 독립적인 의사결정을 통하여 각자의 이익을 극대화하는 분산모형을 제조업체가 추종자이고 배출권 공급업체가 선도자인 Stackelberg 게임으로 구성한다. 제조업체는 확률적 수요를 고려하여 생산량 x 를 결정하며, 배출 허용량을 초과하는 배출량을 거래비용 w 에 공급업체로부터 구매한다. 앞서 Proposition 3에서 제시한 바와 같이 배출 허용량이 충분히 큰 경우 공급망 조정과정이 발생하지 않으므로 제조업체는 언제나 배출권 공급업체로부터 배출권을 구매하는 경우만을 고려하도록 한다. 배출권 공급업체 선도자로서 제조업체의 생산량 정보를 이용하여 최적의 배출권 생산비용을 결정한다. 본 논문에서는 도매가 계약을 기반으로 하되 배출권 생산비용 저감을 위한 투자액 $g(c)$ 중 일정 부분 ($\lambda g(c)$, $0 \leq \lambda \leq 1$)을 제조업체가 부담하는 공급망 계약을 고려하였다.

분산 모형에서 제조업체와 배출권 공급업체의 이익 $\pi_1^w(x)$ 와 $\pi_2^w(c)$ 은 다음 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$\pi_1^w(x) = (p-h)x - pE(x-D)^+ - w(ex-K) - \lambda g(c) \quad (5)$$

$$\pi_2^w(x, c) = (w-c)(ex-K) - (1-\lambda)g(c) \quad (6)$$

λ : 배출권 생산비용 저감을 위한 투자비용 중 제조업체의 공유 비율

w : 배출권 거래비용, $w \geq c$

Proposition 4 : 도매가 계약 분산 공급망에서 제조업체의 투자비용 공유 비율 λ 의 최적값과 최적 생산량 및 배출권 생산비용(\bar{x}, \bar{c})는 다음과 같다.

$$i) \lambda = 0$$

$$ii) \bar{x} = F^{-1}\left(\frac{p-h-we}{p}\right)$$

$$iii) \bar{c} = \begin{cases} c_o & p[1-F(\frac{K+\alpha}{e})] - h < we \\ \underline{c} & otherwise \end{cases}$$

Proof : 우선 배출권 생산비용 c 는 모든 x 에 대하여 $\pi_1^w(x)$ 와 독립적으로 결정되므로 $\lambda=0$ 이 된다. 식 (5)에 제시된 함수 $\pi_1^w(x)$ 의 1차 최적 조건을 이용하면, 최적 생산량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_1^w(x)}{\partial x} &= p-h-pF(x)-we \\ &= 0 \Leftrightarrow pF(\bar{x}) = p-h-we \end{aligned}$$

앞서 결정된 $\lambda=0$ 과 \bar{x} 에 대하여 배출권 생산비용은 $\pi_2^w(\bar{x}, c)$ 의 1차 최적 조건을 이용하여 결정한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_2(\bar{x}, c)}{\partial c} &= -e\bar{x} + K - \frac{\partial g(c)}{\partial c} \\ &= -eF^{-1}\left(\frac{p-h-we}{p}\right) + K + \alpha \end{aligned}$$

$$i) \frac{\partial \pi_2(\bar{x}, c)}{\partial c} = -eF^{-1}\left(\frac{p-h-we}{p}\right) + K + \alpha \leq 0 \Leftrightarrow p[1 - F(\frac{K+\alpha}{e})] - h \geq we$$

이때, c 에 대해서 배출권 공급업체의 총이익이 감소하므로 $\bar{c} = \underline{c}$

$$ii) \frac{\partial \pi_2(\bar{x}, c)}{\partial c} = -eF^{-1}\left(\frac{p-h-we}{p}\right) + K + \alpha > 0 \Leftrightarrow p[1 - F(\frac{K+\alpha}{e})] - h < we$$

이때, c 에 대해서 배출권 공급업체의 총이익이 증가하므로 $\bar{c} = c_o$. \square

Proposition 4에서 제시한 바와 같이 도매 계약에서 $\lambda=0$ 이 되며, 이는 Sackelberg 게임을 구성하는 경우 비용공유 계약이 성립하지 않음을 의미한다. 따라서 식 (5)에서 $\lambda g(c)$ 를 포함하는 것은 의미가 없지만, 본 논문에서 주장하고자 하는 비용공유 계약을 명시적으로 타나내기 위하여 식 (5)의 원래 형태를 유지하도록 한다.

도매가 계약 분산 공급망에서 배출권 생산비용 저감을 위한 투자조건이 앞서 통합 공급망에서 확인한 필요조건 식 (3)과 유사함을 확인하였다. 즉, 배출권 구매비용보다 배출 허용량을 초과한 추가 생산을 통한 이익이 기대되는 경우에 배출권 생산비용 저감을 위한 비용투자가 발생하게 된다.

도매가 계약 분산 공급망에서 배출권 생산비용의 최적값 \bar{c} 을 탄소배출권 거래비용 w 를 기준으로 정리하면, 배출권 거

래비용의 범위에 의하여 배출권 생산비용의 수준이 결정됨을 확인할 수 있다. $w < \frac{p}{e}[1 - F(\frac{K+\alpha}{e})] - \frac{h}{e}$ 인 경우, 즉 거래비용이 충분히 낮은 경우에만 $\bar{c} = \underline{c}$ 로 배출권 생산비용 저감이 이루어짐을 확인할 수 있다. 반대로 배출권 거래비용이 충분히 높으면 배출권 생산비용의 저감없이 공급업체의 이익을 극대화할 수 있으므로 추가적인 비용투자가 이루어지지 않는다.

앞서 제시한 Proposition 4에서 도매가 계약 기반의 분산 공급망 모형의 최적해를 확인하였다. 하지만 일반적으로 도매가 계약 기반의 분산 모형은 중앙집중 모형과 비교하여 공급망의 총 이익이 감소하는 것으로 알려져 있다(Cachon and Lariviere, 2000). 이와 관련하여 다음에 제시하는 Proposition 5에서 도매가 계약을 이용하여 통합 공급망의 최적해에 도달하는 것이 가능하지 않음을 제시하였다.

Proposition 5 : 도매가 계약 분산 모형의 최적해 (\bar{x}, \bar{c}) 는 Nash Equilibrium이지만 통합 모형의 최적해 (x^*, c^*) 과 상이하다.

Proof : $\lambda=0$ 이며, \bar{c} 는 모든 \bar{x} 에 대한 최적의 대응전략이 되며, \bar{x} 는 \bar{c} 와 독립적으로 결정된 최적의 해이므로 (\bar{x}, \bar{c}) 는 Nash Equilibrium이다. 또한 Proposition 1과 비교하여 (x^*, c^*) 와 (\bar{x}, \bar{c}) 는 동일하지 않음을 쉽게 확인할 수 있다. \square

3.3 조정 모형; 비용 공유 계약(Coordinated Supply Chain; Cost-Sharing Contract)

비용 공유 계약에서 제조업체는 배출권 공급업체의 배출권 생산비용 저감을 위한 투자액 $g(c)$ 중 일정 부분을 제공하는 대신에 배출권 가격을 일부 할인받게 된다. 제조업체는 $g(c)$ 에 의하여 일부 비용이 증가하지만, 배출권 거래가격을 감소로 이를 상쇄하여 이익을 증가시키는 것이 가능하다. 배출권 공급업체는 배출권 거래가격의 감소에 의한 이익 감소가 배출권 생산비용 저감 비용보다 작은 경우 이익을 증가시키는 것이 가능하다. 즉, 적절한 수준에서 비용 공유와 배출권 거래비용 할인을 통하여 제조업체와 배출권 공급업체의 이익을 동시에 증가시키기 위한 조정이 이루어지게 된다. 앞서 도매가 계약과 동일하게 제조업체가 추종자이고 배출권 공급업체가 선도자인 Stackelberg 게임을 구성하였다.

비용 공유 계약을 고려한 제조업체와 배출권 공급업체의 이익함수 π_1^c 와 π_2^c 는 다음 식 (7)~식 (8)과 같이 제시된다.

$$\pi_1^c(x) = (p-h)x - pE(x-D)^+ - [w - \gamma(c_o - c)](ex - K) - \lambda g(c) \quad (7)$$

$$\pi_2^c(x, c) = [w - c_o + (1-\gamma)(c_o - c)](ex - K) - (1-\lambda)g(c) \quad (8)$$

λ : 배출권 생산비용 저감을 위한 투자비용 중 제조업체의 비율

γ : 감소된 배출권 생산비용 중 배출권 거래비용 감소에 반영한 비율

Proposition 6 : 비용 공유 계약 분산 공급망의 최적 생산량과 배출권 생산비용(x', c')은 다음과 같다.

$$i) x' = F^{-1}\left(\frac{p-h-e(w-\gamma(c_o-c'))}{p}\right)$$

$$ii) c' = \begin{cases} \underline{c} & \hat{c}_s \leq \underline{c} \\ \hat{c}_s & \underline{c} < \hat{c}_s < c_o \\ c_o & \hat{c}_s \geq c_o \end{cases}$$

여기서 \hat{c}_s 는 $\frac{\partial \pi_2^c(x', c)}{\partial c} = 0$ 를 만족하는 c 값을 의미한다.

Proof : 식 (7)에 제시된 함수 $\pi_1^c(x)$ 의 1차 최적 조건을 이용하면, 최적 생산량은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \pi_1^c}{\partial x} = p-h-pF(x)-e[w-\gamma(c_o-c)] = 0,$$

$$pF(x') = p-h-e[w-\gamma(c_o-c)].$$

x' 를 식 (8)에 대입하여 얻은 함수 $\pi_2^c(x', c)$ 를 이용하여 c' 를 계산하기 위하여 우선 c 에 대한 함수 $\pi_2^c(x', c)$ 의 특성을 분석한다. 함수 $\pi_2^c(x', c)$ 의 1/2차 미분결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \pi_2^c(x')}{\partial c} = -(1-\gamma)(ex' - K) - \frac{e^2\gamma}{pf(x')} [w-c_o + (1-\gamma)(c_o-c)] + (1-\lambda)\alpha \quad (9)$$

$\frac{\partial^2 \pi_2^c(x')}{\partial c^2} = -\frac{e^4\gamma^2}{p^2f^3(x')} < 0$. 따라서 $\frac{\partial \pi_2^c(x')}{\partial c}$ 는 c 에 대하여 감소함수이며, $\pi_2^c(x', c)$ 는 c 에 대하여 오목함수(concave function)가 된다.

$\frac{\partial \pi_2^c(x')}{\partial c} = -(1-\gamma)(ex' - K) - \frac{e^2\gamma}{pf(x')} [w-c_o + (1-\gamma)(c_o-c)] + (1-\lambda)\alpha = 0$ 을 만족하는 c 를 \hat{c}_s 라 하면, c' 은 다음과 같이 결정된다.

$$i) \hat{c}_s \leq \underline{c} \Rightarrow \frac{\partial \pi_2^c(x')}{\partial c} < 0 \quad c \text{에 대해서 이익이 감소하므로}$$

$$c' = \underline{c}$$

$$ii) \hat{c}_s \geq c_o \Rightarrow \frac{\partial \pi_2^c(x')}{\partial c} > 0 \quad c \text{에 대해서 이익이 증가하므로}$$

$$c' = c_o$$

$$iii) \underline{c} \leq \hat{c}_s \leq c_o \text{인 경우 } c' = \hat{c}_s. \quad \square$$

Proposition 7 : 통합 공급망의 최적 의사결정(또는 총 공급망 이익)을 달성하기 위한 비용 공유 계약 조건은 다음과 같다.

$$i) \lambda = \gamma,$$

$$ii) \gamma = \frac{w-c^*}{c_o-c'}$$

Proof : 비용공유 계약에서의 의사결정이 통합 공급망의 최적 해와 동일한 값을 가져야 하며, 이를 위해서는 식 (9)에서 결정된 x' 과 식 (2)에서 결정한 x^* 는 동일한 값을 가져야 한다. 따라서 식 (9) ($\frac{\partial \pi_2^c(x', c)}{\partial c}$) 및 x' 이 통합 공급망의 의사결정인 식 (2) ($\frac{\partial \pi(x^*, c)}{\partial c}$) 및 x^* 와 각각 동일하도록 하는 조건을 찾으려 한다. $\lambda = \gamma$ 과 $\gamma = \frac{w-c^*}{c_o-c'}$ 가 되면, 식 (9)와 식 (2)는 동일한 식이되며 x' 과 x^* 가 일치하여 비용공유 계약을 통하여 통합 공급망의 최적해에 도달하는 것이 가능하다. \square

Proposition 7에서 제시한 비용 공유 계약의 첫 번째 조건 ($\lambda = \gamma$)은 제조업체의 비용 공유 비율과 배출권 거래비용의 감소 비율이 동일하게 결정되어야 해야 함을 제시하고 있다. 즉, 제조업체의 비용 부담 비율과 배출권 거래비용의 절감 비율이 일치 하지 않는 경우 제조업체와 배출권 공급업체의 공급망 조정이 적절하게 이루어질 수 없음을 의미한다. 두 번째 조건, $\gamma = \frac{w-c^*}{c_o-c'}$ 에서 비용 공유 비율이 배출권 거래비용과 배출권 생산비용에 의하여 결정되는 것을 확인하였다. 비용 공유 비율은 배출권 거래비용에 비례하며, 배출권 생산비용의 최대값에 반비례한다. 또한 공급망 조정이 이루어지기 위해서는 $\gamma \leq 1$ 을 만족해야 하므로, 이로부터 c^* 와 c' 의 관계를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\gamma = \frac{w-c^*}{c_o-c'} \leq 1 \Leftrightarrow w-c^* \leq c_o-c' \Leftrightarrow 0 \leq w-c_o \leq c^*-c' \quad (10)$$

식 (10)은 비용 공유 계약에 의한 분산 공급망에서의 배출권 생산비용이 통합 공급망에서의 배출권 생산비용보다 작지 않은 경우에 비용 공유 계약이 성립할 수 있음을 의미한다. 식 (10)의 조건과 반대로 $c^* > c'$ 이 성립한다면, 분산환경에서 배출권 생산비용이 더 저렴하므로 제조업체는 배출권 생산비용 저감을 위한 비용을 모두 부담하고 배출권을 최저가격에 구매함으로써 통합 공급망의 이익보다 더 많은 이익을 얻는 것이 가능하다. 즉, 언제나 $\gamma = 1$ 이 되며, 적절한 비용 공유 계약이 성립하지 않는다.

4. 수치 분석

이번 장에서는 수치예제를 통해서 본 논문에서 제시한 모형 분석결과를 살펴보고자 한다. 수치예제에서 사용한 각 계수의 값은 Du et al.(2013)의 예제를 기반으로 하되, 배출권 생산비용의 상하한 값과 같은 일부 요소는 일부 수정하여 설정하였다. 본 논문에서 사용한 수치예제 자료는 <Table 3>과 같다.

Table 3. Input data for numerical analysis

계수	단위	값
e	kgCO ₂ e/개	1.1
p	원/개	150
h	원/개	15
K	kgCO ₂ e	70
α	-	5
c	원/kgCO ₂ e	20
c _o	원/kgCO ₂ e	40
수요-평균	개/기간	65
수요-표준편차	개/기간	10

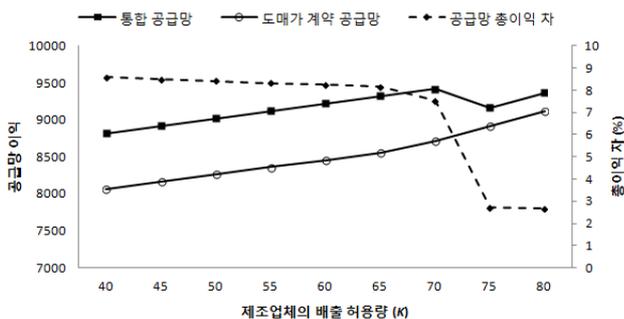


Figure 1. Sensitivity of supply chain profit to emission cap K

제조업체에 할당된 배출허용량 K의 변화에 따른 공급망 총이익의 변화를 살펴보았다. <Figure 1>은 배출 허용량을 40부터 80까지 5단위로 증가시켰을 때 중앙 집중형 통합 공급망의 총이익 π, 도매가 계약에서의 공급망 총이익 π^w = π₁^w + π₂^w 그리고 두 공급망 총이익의 차이((π^w - π) / π × 100%)를 나타낸다.

비용 공유 계약에 의한 공급망 총이익은 조정과정을 통하여 통합 공급망의 총이익과 동일하게 되므로 제외하였다.

통합 공급망과 도매가 계약 공급망의 총이익은 배출 허용량과 비례관계에 있는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 알려진 바와 같이 통합 공급망의 총이익은 도매가 계약 하에서 각 공급망 참여자(즉, 제조업체와 배출권 공급업체)가 독립적인 의사결정을 하는 경우의 공급망 총이익보다 언제나 높은 것을 확인할 수 있다. 하지만 공급망 총이익의 차이는 배출 허용량 K가 증가할수록 감소하게 된다.

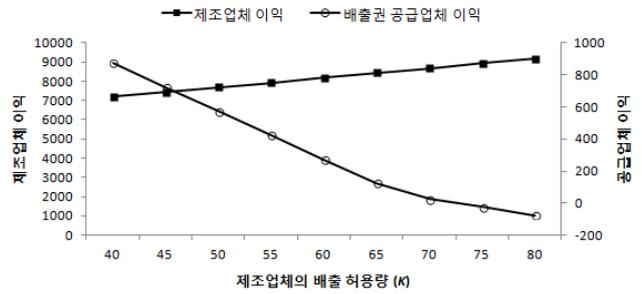


Figure 2. Sensitivity of supply chain profit to emission cap K under wholesale price contract

공급망 총이익의 차이는 배출 허용량 K가 70을 초과하는 경우 급격하게 감소하게 되는데 이는 배출 허용량이 적정 범위를 넘어서기 때문에 발생하는 현상으로 이해된다. Proposition 3에서 제시한 바와 같이 배출 허용량이 K ≤ ex*의 조건을 만족하는 경우에 공급망 참여자 사이의 조정을 통한 이익증가를 기대할 수 있으나, K = 75인 경우 ex* = 74.4로 Proposition 3의 조건을 만족하지 못하게 된다. Proposition 3에서 제시한 배출 허용량의 범위를 초과하는 경우 도매가 계약 공급망의 이익 변화를 살펴보면, 제조업체의 총이익은 잉여 배출권의 판매에 의하여 지속적으로 증가하는 반면에 배출권 공급업체의 이익이 0보다 작은 값이 되어, 공급망 조정이 이루어질 수 없음을 보여준다(<Figure 2> 참조).

제조업체의 배출 허용량이 Proposition 3에서 제시한 범위 내에 있는 경우 최적의 λ (= γ) 즉, 배출권 생산비용 저감에 필요한 비용투자의 제조업체 공유비율을 계산하였다. <Figure 3>에서 점선의 상한은 Proposition 3에서 확인한 배출 허용량의 범위이며, 하한은 비용 공유 비율이 1이 되는 배출 허용량의 값을 의미하며, 배출 허용량의 변화에 따른 최적의 λ를 제시하였다. 배출 허용량이 약 70인 경우(K = 70) λ는 0.5~0.6의 값에서 변동하였다. 배출 허용량이 너무 작은 경우 λ = 1이 되었는데, 이는 많은 비용을 투자해서라도 배출권 생산비용을 줄임으로써 배출권 거래비용을 줄이는 것이 제조업체의 이익을 증가시키는데 도움이 됨을 의미한다. 반대로 배출 허용량이 조정 범위 내에서 증가하는 경우에 λ값이 매우 작지만 다소 증가하였다. 이는 배출권 거래비용의 감소에 따른 제조업

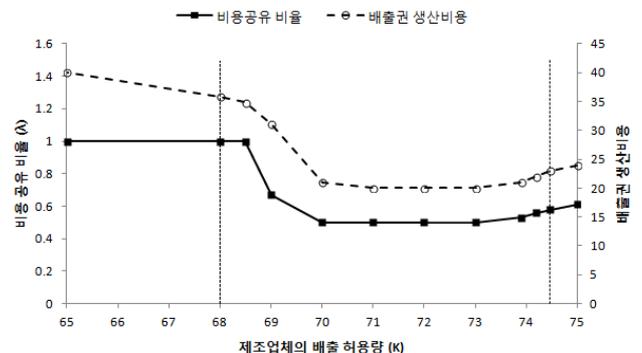


Figure 3. Effects of emission cap K on cost-sharing ratio λ

체의 최적 생산량이 증가함에 따라서 배출권 공급업체는 이익이 증가하므로 비용투자가 요구되는 생산비용 저감의 동인이 감소하여 배출권 생산비용을 상승하게 된다(<Figure 3>의 점선). 따라서 제조업체는 비용 공유를 통하여 일정부부 배출권 생산비용 저감을 유도함으로써 이익을 증가시키는 것이 가능하다.

마지막으로 통합 공급망 모형을 대상으로 배출권 생산비용 저감을 위한 추가적인 비용 투자가 발생하기 위한 조건에 대한 분석을 수행하였다. 식 (3)에서 제시한 바와 같이 배출권 생산비용 저감을 위한 비용투자는 $\hat{c} = \frac{p}{e} [1 - F(\frac{K+\alpha}{e})] - \frac{h}{e}$ 을 기준으로 역치 형태의 규칙을 따른다. \hat{c} 은 p, h 에 비례하며, K, α 에 반비례하는 관계에 있는 것은 쉽게 이해할 수 있으므로, 본 논문에서는 배출계수 e 에 대한 \hat{c} 의 변화와 식 (3)에 제시한 의사결정 기준을 그림으로 표현하고자 한다.

<Figure 4>는 배출계수 e 를 1.0에서 1.15까지 단계적으로 변화시켰을 때 \hat{c} 의 변화와 이를 기준으로 결정되는 배출권 생산비용 저감을 위한 투자 결정 규칙을 나타낸다. \hat{c} 은 배출계수 e 에 대하여 단조증가(monotone increasing)하지만, 본 논문에서 배출권 생산비용의 범위를 $\underline{c} \leq c \leq c_0$ 로 제한하였으므로 \hat{c} 은 <Figure 4>의 실선을 따라 결정된다. 실선으로 표현된 \hat{c} 보다 배출권 생산비용이 작은 경우 비용저감을 위한 추가적인 비용투자가 발생하며, 최적의 배출권 생산비용은 \underline{c} 가 된다.

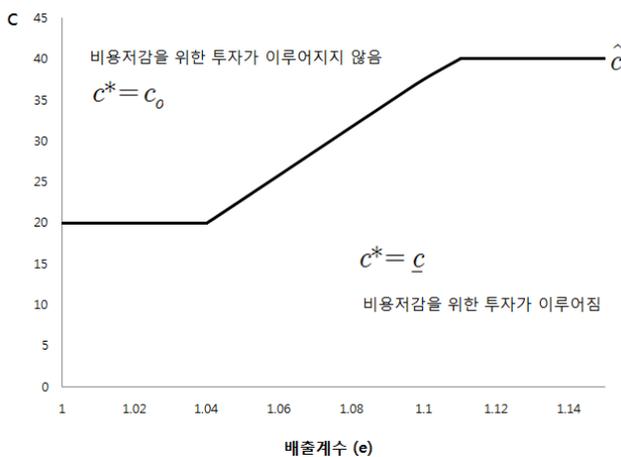


Figure 4. Threshold-type rule for the investment decision

5. 결론

본 논문에서는 제조업체와 배출권 공급업체로 구성된 공급망을 대상으로 공급망 이익을 극대화하기 위한 조건을 분석하였다. 제조업체는 온실가스 배출권 거래제도의 대상기업으로 배출권 거래비용과 불확실한 수요를 고려하여 최적 생산량을 결정하며, 배출권 공급업체는 배출권 생산 비용 저감을 위한 추가적인 비용투자를 결정한다. 제조업체와 배출권 공급업체 사

이에서는 협의매매에 의한 상쇄제도 아래에서 배출권 거래가 이루어진다.

중앙 집중형 의사결정이 가능한 통합 공급망을 대상으로 최적 생산량과 배출권 생산비용을 결정하였다. 또한 배출권 생산비용 저감을 위한 비용투자는 역치 형태의 규칙(threshold-type rule)에 의하여 결정되며, 공급망 조정이 가능한 제조업체의 배출권 허용량의 범위를 제시하였다. 도매가 계약을 이용하는 경우 통합 공급망의 총이익을 달성할 수 없는 반면에 제조업체가 배출권 공급업체의 비용을 일부 공유하는 비용 공유 계약을 적절하게 구성하는 경우 공급망의 총이익을 개선할 수 있음을 제시하였다.

본 논문은 다음과 같은 몇 가지 추가 연구사항을 고려할 수 있다. 첫째, 본 연구에서는 배출권 생산비용 저감을 위한 투자 비용을 선형함수로 가정하였으나, 이를 일반화하여 분석하는 것이 요구된다. 둘째, 도매가 계약과 비용 공유 계약 이외의 공급망 조정 방안을 검토할 수 있다. 공급망 조정을 위한 다양한 계약 모형이 선행연구로 제시되었으며, 이를 배출권 거래를 목적으로 하는 공급망을 대상으로 수정하여 적용하는 것을 검토할 수 있다. 전통적인 공급망 조정 모형은 Cachon(2003)을 참고하기 바란다. 공급망 조정 모형과 함께 본 논문에서는 단일 배출권 공급업체를 고려하였으나 다수의 배출권 공급업체가 존재하는 경우의 문제로 확장하는 것을 고려할 수 있다. 마지막으로 분석 모형의 타당성 검증에 위한 목적으로 선행연구에 참조한 자료를 이용하여 수치실험을 수행하였으나 국내 현실에 적합한 계수를 추정하여 실증연구를 수행하는 것이 요구된다.

참고문헌

- Arikan, E., Fichtinger, J., and Ries, J. M. (2014), Impact of transportation lead-time variability on the economic and environmental performance of inventory system, *International Journal of Production Economics*, Forthcoming, **157**, 279-288.
- Ballot, E. and Fontane, F. (2010), Reducing transportation CO₂ emission through pooling of supply networks : perspectives from a case study in French retail chains, *Production Planning and Control*, **21**(6), 640-650.
- Benjaapar, S., Li, Y., and Daskin, M. (2010), Carbon footprint and the management of supply chains : Insights from simple models, *working paper*.
- Cachon, G. and Lariviere, M. A. (2000). Supply chain coordination with revenue sharing contracts : Strengths and limitations. *Working Paper*, The Wharton School of Business, University of Pennsylvania, Philadelphia.
- Cachon, G. (2003), *Supply chain coordination with contracts*, Chapter 6 in *Handbooks in Operations Research and Management Science : Supply Chain Management*. North-Holland.
- Chaabane, A., Ramudhin, A., and Paquet, M. (2012), Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme, *International Journal of Production Economics*, **135**, 37-49.
- Chen, X., Benjaapar, S., and Elomri, A. (2013), The carbon-constrained EOQ, *Operations Research Letters*, **41**(2), 172-179.

- Cholette, S. and Venkat, K. (2009), The energy and carbon intensity of wine distribution : A study of logistical options for delivering wine to consumers, *Journal of Cleaner Production*, **17**, 1401-1413.
- Dong, C., Shen, B., Chow, P., Yang, L., and Ng, C.T. (2014), Substantiated investment under cap-and-trade regulation, *Annals of Operations Research*, Forthcoming.
- Du, S., Zhu, L., Liang, L., and Ma, F. (2013), Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the cap-and-trade system, *Energy Policy*, **57**, 61-67.
- Giarola, S., Shah N., and Bezzo, F. (2012), A comprehensive approach to the design of ethanol supply chain including carbon trading effects, *Bioresource Technology*, In Press.
- Hoen, K. M. R., Tan, T., Fransoo, J. C., and van Houtum, G. J. (2012), Effect of carbon emission regulations on transport mode selection under stochastic demand, *Flexible Service and Manufacturing Journal*, In Press.
- Hong, W. (2010), *A study on the effect of GHG reduction regulation affecting SMEs*, Korea Small Business Institute.
- Hua, G., Cheng, T. C. E., and Wang, S. (2011), Managing carbon footprints in inventory management, *International Journal of Production Economics*, **132**, 178-185.
- Jiang, Y. and Klabjan, D. (2012), Optimal emissions reduction investment under green house gas emissions regulations, *Working paper*.
- Kohn, C. and Brodin, M. H. (2008), Centralised distribution systems and the environment: how increased transport work can decrease the environmental impact of logistics, *International Journal of Logistics : Research and Applications*, **11**(3), 229-245.
- Lee, J., *Analysis of legal issues involved in emissions trading schemes*, National Assemble Research Service, 2009.
- McKinnon, A. C. and Piecyk, M. I. (2009), Measurement of CO₂ emission from road freight transport : A review of UK experience, *Energy Policy*, **37**, 3733-3742.
- Merrick, R. J. and Bookbinder, J. H. (2010), Environmental assessment of shipment release policies, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, **40**(10), 748-762.
- Plambeck, E. L. (2012), Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management, *Energy Economics*, **34**(S), 64-S74.
- Rizet, C., Browne, M., Cornelis, E., and Leonardi, J. (2012), Assessing carbon footprint and energy efficiency in competing supply chains : Review-Case studies and benchmarking, *Transportation Research Part D*, **17**, 293-300.
- Swami, S. and Shah, J. (2013), Channel coordination in green supply chain management, *Journal of the Operational Research Society*, **64**, 336-351.
- Toptal A., Ozlu, H., and Konur, D. (2014), Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations, *International Journal of Production Research*, **52**(1), 243-269.
- Zhang, B. and Xu, L. (2010), Multi-item production planning with carbon cap and trade mechanism, *International Journal of Production Economics*, **144**(1), 118-127.