

순회배송 물류전략에서 탄소배출 비용의 효과 분석

민 대기[†]

이화여자대학교 경영학과

The Analysis of Carbon Emission Costs under Milk Run Logistics Strategy

Daiki Min

School of Business, Ewha Womans University

■ Abstract ■

This paper develops an analytic model for minimizing the cost of distributing items by truck from one supplier to many customers under Milk run logistics strategy. The model derives formulas for not only inventory and transportation costs but also costs associated with carbon emission trading scheme. In addition, monetary investment for reducing carbon emissions is considered. We analyze how to determine optimal shipment size and carbon emission reduction investment. The purpose of this work is to evaluate the effects of carbon emission trading scheme on the Milk run logistics strategy in terms of how much to reduce carbon emissions and/or inventory and transportation costs. We analytically show that it is possible to reduce carbon emissions while reducing inventory and transportation costs by introducing cap-and-trade carbon emission trading scheme under certain conditions.

Keywords : Cap-and-Trade Carbon Emission Trading Scheme, Milk Run Logistics, Investment, Shipment Size

1. 서 론

물류 분야는 전 세계 온실가스배출량의 약 6%의 낮지 않은 비중을 차지하고 있다[28]. 우리나라의 수송/물류부문 감축 목표 전망을 살펴보면 2010년을 기준으로 2020년까지 기존 탄소배출량의 38%, 약 4600만 톤의 탄소배출량 저감을 정책적 목표로 설정하고 있다[2]. 이와 같이 수송/물류 분야에서의 탄소배출량 저감은 우리나라의 저탄소 정책과 기업의 친환경 전략을 실현하기 위한 중요한 고려 대상이 된다.

우리나라는 지난 2012년 제정된 “온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률 시행령”을 통하여 2015년부터 탄소배출권거래제도를 본격적으로 시행할 계획이다. 탄소배출권거래제도는 환경문제를 시장을 통하여 해결하고자하는 국제적인 접근법인 동시에 기업 경영 관점에서는 탄소배출량이 기업의 수익과 비용에 영향을 주는 새로운 성장 패러다임으로 고려되고 있다. 하지만 대부분의 국내 기업이 탄소배출권거래제도의 취지에 공감함에도 불구하고 비용 상승에 따른 기업 경쟁력 하락을 우려하고 있다[4]. 따라서 탄소저감과 함께 비용 경쟁력 확보를 위한 기업의 물류전략 또한 탄소배출권거래제도의 틀에서 새롭게 평가하는 것이 요구된다.

일반적으로 물류전략은 수송비용과 재고비용을 고려하여 결정된다. 예를 들어 다빈도 소량수송 전략에 따라서 수송원가가 높아지더라도 평균 재고량을 감소시키거나 반대로 높은 재고량을 유지하더라도 대량수송을 통하여 수송원가를 감소시키는 전략 사이에서 최적 방안을 결정한다. 본 연구에서는 수송비용과 재고비용의 상호관계에 더하여 탄소배출권거래제도와 탄소저감을 위한 비용투자를 함께 고려함으로써 전통적인 물류전략과 운영방식이 저탄소 경제체제 아래에서도 동일하게 활용될 수 있는가를 평가하고자 한다.

순회배송 물류전략은 직배송 전략 등과 함께 물류시스템의 구조를 결정하는 기본 전략의 하나이다. 본 논문에서는 단일 공급지를 출발하여 다수의 고객

객을 순차적으로 방문하는 순회배송 물류전략을 대상으로 탄소 배출권 거래제도 도입에 따른 효과를 탄소배출량과 물류비용의 관점에서 분석하고자 한다. 이를 위하여 순회배송 물류전략에서 발생하는 비용을 최소화하는 최적화 수리모형을 제시하고 모형의 구조적 특성을 분석하였다. 순회배송 물류전략에서 비용 최소화 문제와 관련한 기존 연구는 많은 경우에 있어 차량경로 문제(Vehicle Routing Problem; VRP)와 같이 이동거리의 설계와 예측에 초점을 맞추었다[5]. 하지만 본 연구에서는 최적경로를 고려하는 대신에 고객 밀집도에 따른 차량 이동거리와 같은 배송지역의 특성을 고려하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 본 연구와 관련된 문헌조사를 통하여 본 논문과 기존 문헌사이의 차이점을 설명하도록 한다. 제 3장에서는 순회배송 물류전략의 비용 분석을 위한 수리모형과 최적해를 제시한다. 제 4장에서는 탄소배출권 거래제도 도입에 따른 효과를 탄소배출량과 총 비용의 관점에서 분석한다. 마지막으로 제 5장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구주제를 제시한다.

2. 문헌연구

물류영역에서 탄소배출을 고려한 문제는 최근 많은 관심을 받고 있는 연구주제로 관련하여 회수물류 및 폐기물관리[15, 16], 수송모드 선정[18], 탄소배출량 산정[12, 25] 등과 관련한 연구가 많이 진행되었다. 하지만 탄소배출 비용에 의한 전통적인 물류전략의 변화를 예상할 수 있음에도 불구하고 탄소배출권거래제에 의한 전통적인 물류전략의 변화를 구조적으로 평가한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 수송비용과 재고비용에 더하여 탄소배출 비용을 고려함으로써 기존의 물류전략을 재평가하고 탄소저감을 위한 물류 운영 문제를 해결하기 위한 합리적 방법론을 제공하는 것이 요구된다.

탄소배출을 고려한 물류 운영 연구는 최근 다수 존재하는데, 일부 연구는 선형계획법(linear programming)을 이용하여 공급망 모형에 탄소배출량 제약

과 거래비용을 반영하고 그 영향을 수치 실험을 통하여 평가하였다[6, 10, 17]. Merrick and Bookbinder[23]는 탄소배출량을 고려하여 다빈도 소량수송과 소빈도 대량수송의 두 가지 수송정책(dispatch policy)를 비교하였는데, 시뮬레이션 연구를 통하여 물류 비용과 탄소배출량을 동시에 감소시키기 위한 조건을 제시하였다. Hoen et al.[18]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 제한하거나 배출량에 비례하여 비용을 추가하는 방식을 고려하였다. 보다 상세한 내용은 경영과학 방법론을 적용한 연구는 Dekker et al.[14]의 문헌연구를 참고하도록 한다.

수리모형을 이용한 구조적 분석방법을 활용한 연구는 대부분 재고보충 문제에서 물류운영 비용과 탄소배출 비용을 고려한 주문량 결정 문제를 대상으로 전통적인 EOQ(Economic Order Quantity) 모형을 확장하여 제시되었다. Benjaafar et al.[6]과 Chen et al.[11]은 EOQ 모형에 탄소배출량 제약을 적용한 모형을 제안하고 주문량 조정을 통하여 탄소배출량과 EOQ 비용을 동시에 감소시키기 위한 조건을 분석하였다. Hua et al.[19]은 탄소배출권 거래제에 따른 거래비용을 제약식과 목적함수에 포함한 새로운 EOQ 모형을 제시하여 탄소거래 비용을 고려한 최적 주문량을 도출하였다. Toptal et al.[27]은 Hua et al.[19]의 모형을 확장하여 자체적인 탄소저감을 위한 비용 투자를 EOQ 모형과 함께 고려하였다. Zhang and Xu[30]는 다수 제품 모형을 대상으로 하는 확장모형을 제시하였는데, Newsvendor 모형을 이용하여 단일기간의 수요 불확실성을 함께 고려하였다.

앞서 제시한 바와 같이 EOQ를 확장한 연구는 다수 존재하고 있으나, EOQ 모형은 재고보충 전략이나 직배송 물류전략에 적합한 모형으로 본 논문에서 대상으로 하는 순회배송 물류전략을 반영하지 못하고 있다. 순회배송 물류전략은 총 이동거리 감소

나 고객 수요의 통합적 관리에 의한 재고 효율성 증대에 의하여 직배송 전략과 비교하여 일반적으로 수송 및 재고 비용이 적은 것으로 알려져 있다[8]. 이와 같은 비용 측면의 장점으로 순회배송 물류전략은 광범위하게 활용되고 있으며 관련 연구 또한 활발하게 진행되고 있다[5, 8, 24].

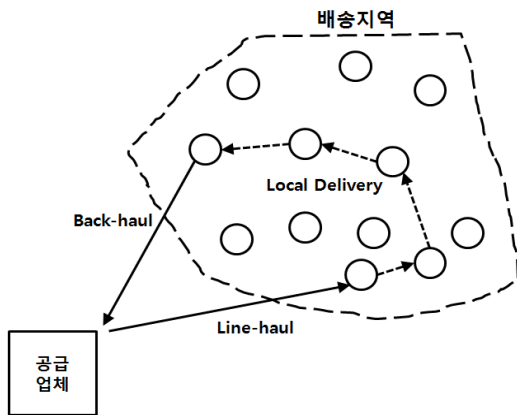
순회배송 물류전략의 광범위한 사용에도 불구하고 탄소배출 비용을 고려한 연구는 미흡한 편이다. 많은 연구가 차량 대형화, 친환경 연료, 탄소저감 장치, 에코드라이브 활동[3]과 같이 직접 배출원의 연료 효율성 개선을 통한 탄소배출량 감소에 초점을 맞추고 있다. 이와 같이 직접 배출원의 효율성 개선에 의한 탄소저감 효과에 대한 사례연구는 존재하지만 본 논문에서 고려하는 바와 같이 운영 수준에서 탄소배출 비용의 영향을 이론적으로 분석한 연구는 매우 미흡한 편이다. Bektas and Laporte[7]은 전통적인 차량 경로결정 문제에 탄소배출 비용을 포함하는 모형을 제시하였다. 하지만 경로결정 문제는 탄소배출 비용의 영향을 구조적으로 분석하고자 하는 본 논문의 목적과 차이가 있다. 탄소배출 비용을 고려한 차량경로결정 문제(GVRP; Green Vehicle Routing Problem)에 대한 상세한 내용은 Lin et al.[22]의 문헌연구를 참고하도록 한다.

순회배송 물류전략에서 탄소배출권거래제의 영향을 분석하고자 하는 본 논문은 기존 연구와 다음과 같은 차별성을 갖는다. 첫째, 대부분의 연구가 EOQ를 기반으로 재고보충 또는 직배송 물류전략을 대상으로 하고 있다. 하지만 본 연구는 순회배송 물류전략을 대상으로 탄소배출권거래제도 도입에 의한 영향을 수리모형을 이용하여 구조적으로 분석하였다. 일부 연구에서 문헌조사와 사례연구를 통하여 물류전략과 탄소배출량 사이의 유의미한 관계를 고려하고 있으며, 순회배송 물류전략의 탄소저감 효과를 제시하고 있다. 하지만 탄소배출권거래제의 효과를 체계적으로 분석하기 위한 접근법으로 사례연구 이외에 수리모형을 이용한 연구는 미흡한 편이다. 따라서 탄소배출권거래제도 하에서 순회배송 물류전략의 발전 전략을

수립함에 있어 본 논문의 결과를 효과적으로 활용할 수 있을 것이다. 둘째, IPCC 가이드라인[21]과 GHG Protocol[29]과 같은 탄소배출량 측정 방법론은 차량의 배송거리와 특성을 고려하도록 제시하고 있다. 기존 연구에서 충분하게 고려하지 못한 이와 같은 배송지역의 세부 특성(예, 배송지역까지의 거리, 밀집도 등)을 본 논문에서 제시하는 모형에 포함하였다. 셋째, 탄소저감을 위한 기업 자체적인 비용투자 효과를 명시적으로 고려하였다. Toptal et al.[27]은 비용투자에 대한 탄소저감 효과를 투자비용의 2차 함수 형태로 제시하였다. 본 논문에서는 Toptal et al.[27]의 모형을 사용하여 순회배송 물류전략에서 탄소저감을 위한 비용투자 효과를 분석하였다.

3. 순회배송 물류전략의 비용 분석

순회배송 물류전략은 한대의 차량이 공급지를 출발하여 다수의 고객을 방문하고 다시 공급지로 돌아오는 방식을 의미한다[그림 1]. 이번 장에서는 순회배송 물류전략의 물류비용을 최소화하는 최적 운영방안, 즉 최적 배송량을 결정하기 위한 수리모형을 제시한다. 또한 이를 탄소비용(즉, 탄소배출권거래 비용과 탄소저감을 위한 비용 투자)을 포함한 문제로 확장하여 제시하도록 한다.



[그림 1] 순회배송 물류전략

<표 1> 기호 요약

기호	설명
입력자료	
d	개별 고객의 일수요(개/일)
ρ	고객 밀도(고객 수/km ²)
p	탄소거래비용(원/kgCO _{2e})
h	재고유지비용(원/개-일)
γ	1회 배송별 고정 차량비(원/회)
c	거리 당 차량운영비(원/km)
σ	1회 고객 방문 시 고정비용(원/회)
L	고객지역까지의 평균 왕복거리(line-haul+back-haul)(km)
\hat{h}	재고에 의한 탄소배출량(kgCO _{2e} /개-일)
\hat{c}	차량에 의한 탄소배출량(kgCO _{2e} /개-일)
\bar{C}	탄소배출 허용량(Carbon Cap)(kgCO _{2e} /일)
V	차량 용량(개)
결정변수	
Q	일회 배송량(Shipment Size)(개/회)
X	탄소 거래량(kgCO _{2e} /일)
n	배송지역의 크기(고객의 수)
G	탄소저감을 위한 투자액(원/개-일)

3.1 비용 최적화 모형

순회배송 물류전략의 최적 배송량 결정은 Burns et al.[9]의 모형을 참고하였다. Burns et al.[9]이 제안한 모형에서 최적 배송량은 전통적인 EOQ 모형과 유사하게 수송비용과 재고유지비용의 관계를 고려하여 결정되지만, 순회배송 물류전략의 특성을 고려하여 차량의 이동거리 등을 명시적으로 포함하였다.

한번 차량이 공급지를 출발하는 경우에 이동 거리와 관계없이 고정비용 γ 가 발생한다. 차량의 총 이동거리는 고객지역까지의 평균 왕복 이동 거리(line-haul과 back-haul의 합) L 과 지역 내 이동거리(local delivery)로 구성된다. 순회배송 물류전략에서 공급업체로부터 고객지역까지의 왕복 이동 거리를 제외한 지역 내 이동거리는 $k\sqrt{mn}/\rho$ 이 된다[26]. k 는 m 이 2보다 큰 경우 배송지역의 구조를 결정하는데 필요한 상수로 약 0.6의 값을 갖는다[13]. 여기서 m

은 한번 배송과정에서 평균적으로 방문하는 고객의 수로 배송지역내의 고객수보다 작은 값을 갖는다(즉, $m \leq n$). 본 논문에서는 문제를 단순화하기 위하여 개별 고객의 수요가 d 로 동일한 것을 가정하며, 이 경우 $m = n[1 - (1 - 1/n)^Q]$ 이 된다[9]. 따라서 이동거리에 따라서 결정되는 가변 수송비용은 $c(L + k\sqrt{mn/\rho})$ 이 된다.

마지막으로 각 고객 지점에서 화물의 상·하차 작업 등에 의하여 고객 방문 시에 발생하는 고정비용 σ 를 고려하였다. D 는 배송지역의 총 수요를 의미하며, 개별 고객 수요가 d 로 동일하므로, 총 수요는 $D = nd$ 가 된다. 기간 내에 수송 횟수는 D/Q 이므로 [표 1]에 제시된 기호를 이용하여 계산한 총 수송비용은 다음 같다:

$$(\gamma + cL + ck\sqrt{mn/\rho} + \sigma m)D/Q.$$

기간별 수요가 일정하다면 공급업체와 각 고객지점에 존재하는 평균 재고량은 각각 $Q/2$ 로 시스템 내에 존재하는 총 재고량은 Q 가 되며, 총 재고유지비용은 hQ 가 된다. 따라서 수송비용과 재고비용을 더하여 결정되는 순회배송 물류전략의 기간별 총 비용을 이용하여 비용 최적화 모형을 다음 식 (1), 식 (2)와 같이 결정하였다.

$$\text{Minimize}_Q \quad TC_0(Q) \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad TC_0(Q) = hQ + (\gamma + cL + ck\sqrt{mn/\rho} + \sigma m) \frac{D}{Q} \tag{2}$$

$$0 \leq Q \leq V \tag{3}$$

Theorem 1 : 비용 최적화 모형 식 (1)~식 (3)의 최적 배송량은 차량 용량과 동일하다. 즉, $Q^0 = \text{argmin}_Q TC_0(Q)$ 이면, $Q^0 = V$ 이다.

Proof : Theorem 1의 증명은 Burns et al.[9]의 Theorem 1과 동일한 절차로 증명한다. 개별 고객이 평균적으로 한 번에 받는 배송량이 q 라면 $Q/q = n$ 이 된다.

$m = n[1 - (1 - 1/n)^Q] = (Q/q)f(Q, q)$ 이라면, $f(Q, q)$ 는 Q 에 대하여 감소하는 함수가 된다. 식 (2)를 $f(Q, q)$ 를 이용하여 다시 표현하면

$$TC_0(Q) = hnq + \frac{(\gamma + cL)d}{q} + \frac{ck}{\sqrt{\rho}} \frac{\sqrt{f(Q, q)}}{q} + \frac{\sigma Df(Q, q)}{q}$$

이며, 이는 어떠한 q 가 주어졌을 때 Q 에 대하여 감소하는 함수가 된다. 따라서 $TC_0(Q)$ 를 최소화하는 최적해는 $Q^0 = V$ 이며, 이는 최적 배송량이 차량용량과 동일함을 의미한다. □

Theorem 1의 결과, 즉 최적 배송량을 이용하여 배송지역 크기 n 의 최적값을 결정한다. 일반적인 경우에 대하여 n 의 최적값을 간단한 형태(closed form)로 표현하는 것이 불가능하다. 따라서 분석의 용이성을 위하여 다음 [가정 1]에 기반하여 이후 분석을 진행한다.

가정 1 : $m = n$ 즉, 차량은 배송지역 내의 모든 고객을 방문한다. [가정 1]은 일반적으로 배송지역 내 고객과 비교할 때 차량용량이 충분한 경우로 물류센터에서 고정된 경로를 따라서 배송이 이루어지는 경우에 적용이 가능하다. 관련하여 차량부품의 배송과 같이 제조 산업에서 모든 고객이 많아야 한 개의 제품을 배송받는 상황, 즉 $m = V$ 와 같은 가정을 고려할 수 있으나 본 논문에서는 $m = n$ 만을 대상으로 분석을 수행하도록 한다.

Proposition 1 : 비용 최적화 모형(식 (1)~식 (3))에서 최적 배송지역 n^0 는 $n^0 = V$ $\sqrt{\frac{h}{dB^0}}$, $B^0 = \sigma + kc/\sqrt{\rho}$ 이 된다.

Proof : $\partial TC_0(Q)/\partial n > 0$ 으로 총 비용은 배송지역의 크기에 비례한다. 따라서 최적 배송지역의 결정을 위하여 제품별 단위 비용을 평가하면 다음 결론을 도출하게 된다.

$$\frac{\partial TC_0(Q^*)/D}{\partial n} = -\frac{Vh}{n^2d} + \frac{kh}{V\sqrt{\rho}} + \frac{\sigma}{V} = 0$$

$$\Leftrightarrow n^0 = V\sqrt{\frac{h}{dB^0}}, B^0 = \sigma + kc/\sqrt{\rho}. \quad \square$$

[가정 1]에서 $m=n$ 을 가정하였으므로 방문고객의 수를 결정하는 문제는 배송지역의 크기를 결정하는 문제가 되며, 차량이 배송을 위하여 한번 출발하는 경우 배송지역 내에 존재하는 n^0 의 고객을 방문하게 된다. Proposition 1에서 $B^0 = \sigma + kc/\sqrt{\rho}$ 는 한 개의 고객을 추가로 방문할 때 발생하는 고정비용을 의미한다. 따라서 최적 배송지역의 크기 n^0 는 고객 방문비용과 개별 고객의 수요에 반비례하고, 차량용량과 재고유지비용에 비례하여 증가한다.

[가정 1]과 달리 $m=V$ 인 경우 식 (2)를 Proposition 1과 동일한 절차로 분석하면 최적 배송지역의 크기는 $n^0 = V(\frac{2h\sqrt{\rho}}{dkc})^{2/3}$ 이 된다. $m=V$ 인 경우의 최적 배송지역의 크기는 Proposition 1의 결과와 비교할 때 다음과 같은 특성을 갖는다. 우선, 최적 배송지역의 크기는 고객 방문에 따른 고정비용 σ 에 독립적으로 결정되며, $(h/d)^{2/3}$ 에 비례한다. 이는 결국 $m=V$ 을 가정하는 경우 최적 배송지역의 크기가 지역 내 이동거리 보다는 재고유지비용에 더 민감하게 반응하는 것을 의미한다. 이와 같은 특성 차이에도 불구하고 [가정 1]에서 언급한 바와 같이 이후 분석과정은 $m=n$ 만을 대상으로 한다.

3.2 탄소배출 비용을 고려한 최적화 모형

식 (1)~식 (3)에서 제시한 비용 최적화 모형을 확장하여 탄소거래비용과 탄소저감을 위한 비용투자를 고려하도록 한다. 재고보관 과정의 배출계수가 \hat{h} 이고 차량 운행과정에서의 배출계수가 \hat{c} 이면, 재고보관 과정과 차량운행 과정에서 발생하는 탄소배출량을 더한 총 탄소배출량은 $\hat{h}Q + (\hat{c}L + \hat{c}k\sqrt{mn}/\rho)$ $\frac{D}{Q}$ 가 된다.

본 연구에서는 재고와 차량에 의한 탄소배출량을

저감하기 위한 개별 기업의 투자를 함께 고려하였다. 탄소배출량 저감을 위한 기업의 기간별 비용 투자액이 G 이면, $\alpha G - \beta G^2$ ($0 \leq G \leq \alpha/\beta$)의 탄소배출량이 감소하는 것으로 알려져 있다[20, 27]. 탄소배출량 저감규모 $\alpha G - \beta G^2$ 는 비용 투자액 G 에 대하여 증가하는 오목 형태의 함수(increasing concave function)가 된다. 즉, 투자액이 증가할수록 탄소배출량 감소량은 비례하여 증가하지만, 배출량 감소율은 줄어들게 된다. 여기서 α 는 새로운 친환경 기술과 같이 비용투자에 의한 탄소배출량 감소를 나타내는 계수이고, β 는 탄소배출량 감소율이 줄어드는 것을 나타내는 계수이다. 탄소배출량 저감 규모를 고려한 순회배송 물류전략에서의 총 탄소배출량은 다음 식과 같이 결정된다.

$$E(Q, G) = \hat{h}Q + (\hat{c}L + \hat{c}k\sqrt{mn}/\rho) \frac{D}{Q} - \alpha G + \beta G^2$$

2015년부터 탄소배출권거래제도의 시행을 계획하고 있는 우리나라의 상황을 고려하여, 본 논문에서는 탄소배출권거래제도를 모형에 포함하였다. 탄소배출 허용량과 탄소배출권 거래규모가 각각 \bar{C} 와 X 라고 하면, 탄소배출권거래제도를 고려한 순회배송 물류전략의 최적화 모형은 다음 식 (4)~식 (8)와 같이 제시할 수 있다.

$$\text{Minimize}_{Q, G} \quad TC(Q, G) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad TC(Q, G) = hQ + (\gamma + cL + ck\sqrt{mn}/\rho + \sigma m) \frac{D}{Q}$$

$$+ G - pX \quad (5)$$

$$E(Q, G) + X = \bar{C} \quad (6)$$

$$0 \leq Q \leq V \quad (7)$$

$$0 \leq G \leq \alpha/\beta \quad (8)$$

식 (6)은 탄소배출권거래제도를 나타낸다. 배출권 거래량 X 가 양의 값을 갖는다면 배출권 판매를 통한 이익을 기대할 수 있으며, 반대로 0보다 작은 X 값은 추가 구매에 의한 비용발생을 의미한다.

식 (6)를 식 (5)에 대입하여 하나의 식으로 정리하여 다음의 식 (9)를 도출하였다.

$$TC(Q, G) = (p\hat{h} + h)Q + (\gamma + \sigma m) \frac{D}{Q} + (L + k\sqrt{mn/\rho})(p\hat{c} + c) \frac{D}{Q} + G(1 - \alpha p + \beta p G) - pX \quad (9)$$

Theorem 2 : 탄소배출 비용을 고려한 최적화 모형 식 (4)~식 (8)의 최적해는 $(Q^*, G^*) = (V, \frac{\alpha p - 1}{2\beta p})$ 이다.

Proof : $Q^* = V$ 는 Theorem 1의 증명과 동일한 절차에 의하여 증명이 가능하다. 또한 식 (9)로부터 $\frac{\partial TC(Q, G)}{\partial G} = 1 - \alpha p + 2\beta p G = 0 \Leftrightarrow G^* = \frac{\alpha p - 1}{2\beta p} \quad \square$

Theorem 2에서 도출한 최적의 투자규모 $G^* = \frac{\alpha p - 1}{2\beta p}$ 는 0보다 큰 값을 갖는 것이 타당하다. 만일 $G^* \leq 0$ 이면 투자에 의한 탄소배출량 감소보다 G^* 의 비용 만큼 탄소배출권을 구매하는 것이 효과적인 대응이 된다. 즉, 자체적인 노력에 의한 탄소배출량 저감의 동인이 발생하지 않는다. 따라서 이후 분석과 정에서 다음과 같은 가정을 수립하도록 한다.

가정 2 : $G > 0 \Leftrightarrow \alpha p > 1$.

Theorem 2의 결과와 [가정 1]을 이용하여 탄소배출 비용을 고려한 경우의 최적 배송지역 크기 n^e 를 결정한다.

Proposition 2 : 탄소배출 비용을 고려한 최적화 모형에서 최적 배송지역 n^e 는 다음과 같이 결정된다;

$$n^e = V \sqrt{\frac{h^e}{dB^e}}, \quad h^e = p\hat{h} + h, \quad B^e = \sigma + k(p\hat{c} + c)/\sqrt{\rho}.$$

Proof : 제품별 단위 비용을 평가하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial TC(Q^*, G^*)/D}{\partial n} &= -\frac{Vh^e}{n^2d} + \frac{k(p\hat{c} + c)}{V\sqrt{\rho}} + \frac{\sigma}{V} = 0 \\ \Leftrightarrow n^e &= V \sqrt{\frac{h^e}{dB^e}}, \quad h^e = p\hat{h} + h \\ B^e &= \sigma + k(p\hat{c} + c)/\sqrt{\rho}. \quad \square \end{aligned}$$

$B^e = \sigma + k(p\hat{c} + c)/\sqrt{\rho}$ 와 $h^e = p\hat{h} + h$ 는 탄소배출 비용을 고려한 경우 한 개의 고객을 추가로 방문할 때 발생하는 고정비용과 재고유지비용을 의미한다.

최적해 $(Q^*, G^*) = (V, \frac{\alpha p - 1}{2\beta p})$ 와 n^e 를 식 (9)와 식 (6)에 대입하여 총 비용, 탄소배출량 및 탄소거래량을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} TC(Q^*, G^*) &= V(p\hat{h} + h) + \frac{D^e}{V}(A^e + n^e B^e) \\ &\quad - \frac{(\alpha p - 1)^2}{4\beta p} - p\bar{C} \\ E(Q^*, G^*) &= V\hat{h} + \frac{D^e \hat{c}}{V}(L + kn^e/\sqrt{\rho}) + \frac{1 - \alpha^2 p^2}{4\beta p^2} \\ X(Q^*, G^*) &= \bar{C} - V\hat{h} - \frac{D^e \hat{c}}{V}(L + kn^e/\sqrt{\rho}) - \frac{1 - \alpha^2 p^2}{4\beta p^2} \end{aligned}$$

여기서 $D^e = dn^e$ 이고, $A^e = \gamma + (p\hat{c} + c)L$ 이다. D^e 는 최적 배송지역의 총 수요이고, A^e 는 탄소배출을 고려하는 경우공급업체로부터 배송지역까지의 왕복운행에 소요되는 비용을 의미한다.

4. 탄소배출 비용의 효과 검토

탄소배출권거래제도는 탄소배출권에 대한 거래를 허용함으로써 기업들의 자발적인 탄소배출량 감축을 유도하고 이를 통하여 국가 총 배출량을 저감하는데 기본 목적을 두고 있다. 이번 장에서는 순회배송 물류전략에서 탄소배출권거래제도의 도입에 따른 효과를 탄소배출량과 총 비용의 관점에서 분석하였다. 이를 통하여 탄소배출량 저감과 함께 기업의 총 비용을 동시에 줄이기는 것이 가능하며, 이를 가능하게 하는 조건을 확인하고자 한다.

4.1 탄소배출량 저감 효과

이번 장에서는 순회배송 물류전략에서 탄소배출권거래제도에 의한 탄소저감 효과를 평가한다.

Proposition 3 : 탄소저감을 위한 최적의 투자가 이루어지는 경우 탄소배출량이 감소한다. 즉, $Q_0^* = \operatorname{argmin}_Q TC(Q, 0)$ 이라고 하면, $E(Q^*, G^*) < E(Q_0^*, 0)$ 이 성립한다.

Proof : Theorem 2의 결과로부터

$$E(Q_0^*, 0) = \hat{V}h + \frac{D^e \hat{c}}{V}(L + kn^e / \sqrt{\rho}),$$

$$E(Q^*, G^*) = \hat{V}h + \frac{D^e \hat{c}}{V}(L + kn^e / \sqrt{\rho}) + \frac{1 - \alpha^2 p^2}{4\beta p^2},$$

$$E(Q_0^*, 0) - E(Q^*, G^*) = \frac{\alpha^2 p^2 - 1}{4\beta p^2}.$$

[가정 2]에 의하여 $\alpha p > 1$ 이므로 $E(Q_0^*, 0) - E(Q^*, G^*) > 0$ 이 성립한다. \square

Proposition 4 : $\frac{h}{B^0} > \frac{h^e}{B^e}$ 을 만족하는 경우 비용최적화 모형 식 (1)~식 (3)와 비교하여 탄소배출 비용을 고려한 최적화 모형 식 (4)~식 (8)을 이용함으로써 탄소배출량을 감축하는 것이 가능하다. 즉, $E(Q_0^*, 0) < E(Q^0, 0)$ 이 성립한다.

Proof : $E(Q^0, 0) = \hat{V}h + \frac{D^0 \hat{c}}{V}(L + kn^0 / \sqrt{\rho})$ 이므로,

$$E(Q^0, 0) - E(Q_0^*, 0) = \frac{\hat{c}k}{V\sqrt{\rho}}(D^0 + D^e)(n^0 - n^e)$$

을 도출할 수 있다.

여기서 Proposition 1과 Proposition 2에서 계산한 결과로부터 $\frac{n^0}{n^e} = \sqrt{\frac{h/B^0}{h^e/B^e}}$ 이므로,

i) $\frac{h}{B^0} > \frac{h^e}{B^e}$ 이면, $E(Q_0^*, 0) < E(Q^0, 0)$ 이고

ii) $\frac{h}{B^0} \leq \frac{h^e}{B^e}$ 이면, $E(Q_0^*, 0) \geq E(Q^0, 0)$ 이 성립한다. \square

Proposition 4는 탄소배출권거래제도를 도입함에 있어 탄소배출량 감소가 가능한 조건을 명시적으로 제시하고 있다. 즉, 탄소배출량 저감을 위해서는 재고유지비용(h 또는 h^e)과 고객방문비용(B^0 또는 B^e)의 비율이 $h/B^0 > h^e/B^e$ 의 조건을 만족해야 한다. 탄소배출권거래제도 아래에서 배출량 저감을 위한 조건이 개별 비용의 절대값 대신에 비용 사이의 비율에 의하여 결정된다는 것은 매우 흥미로운 결과이다. 이와 같은 결과는 직배송 시스템[1]과 EOQ 모형에 탄소배출 비용을 고려한 기존 연구결과 [6, 11, 27]와 유사한 특성을 갖는다. 특히 EOQ 기반의 모형에서는 재고유지비용과 주문비용의 비율이 탄소배출 비용을 고려하더라도 동일하면 최적 주문량에 변함이 없음을 제시하였다.

Theorem 3 : 탄소배출권거래제도와 관련하여 $\frac{h}{B^0} > \frac{h^e}{B^e}$ 이 성립하는 경우 다음 사항이 성립된다.

i) 순회배송 물류전략에서 탄소비용(즉, 탄소배출권거래 비용과 탄소저감을 위한 투자비용)을 고려함으로써 탄소배출량을 줄이는 것이 가능하다.

ii) 탄소저감 규모는 $\frac{\alpha^2 p^2 - 1}{4\beta p^2} + \frac{\hat{c}k}{V\sqrt{\rho}}(D^0 + D^e)(n^0 - n^e)$ 이 된다.

iii) 탄소저감 규모는 탄소거래가격(p), 수요(D^0 , D^e), 탄소비용에 의한 배송지역의 조정 규모 ($n^0 - n^e$) 등에 비례한다.

iv) 탄소저감 규모는 차량 용량(V), 고객밀도(ρ)에 반비례 한다.

Proof :

i) Proposition 3과 Proposition 4에 의하여

$\frac{h}{B^0} > \frac{h^e}{B^e}$ 이면, $E(Q^*, G^*) < E(Q_0, 0)$ 이 성립하며, 이는 탄소배출권거래제도 도입에 의한 탄소배출량 감소를 의미한다.

ii) 감축된 탄소배출량은 $E(Q_0, 0) - E(Q^*, G^*)$ 로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{\alpha^2 p^2 - 1}{4\beta p^2} + \frac{\hat{c}k}{V\sqrt{\rho}}(D^0 + D^e)(n^0 - n^e).$$

iii)과 iv)의 특성은 ii)에서 도출한 탄소배출량 감축 규모로부터 확인할 수 있다. □

Theorem 3은 Proposition 4를 확장하여 탄소배출권거래제도를 고려하는 경우 적절한 비용 투자를 통하여 기대할 수 있는 탄소배출량 저감규모와 함께 배출량 저감을 위한 기본 조건을 제시하고 있다.

4.2 비용절감 효과

이번 장에서는 순회배송 물류전략에서 탄소배출권거래제도를 도입하는 경우 비용의 변화를 분석하였다. 특히, 다음에 제시하는 Theorem 4는 탄소배출량 감축과 함께 총 비용을 절감할 수 있으며, 이를 가능하게 하는 조건을 제시한다.

Theorem 4 : 다음 조건 식 (10)을 만족하는 경우 탄소배출권거래제도를 도입하더라도 총 비용을 절감하는 것이 가능하다;

$$(n^0 - n^e) \left[\frac{VA^0}{d} + \frac{B^0}{V}(D^0 + D^e) \right] + \frac{(\alpha p - 1)^2}{4\beta p} + p\bar{C} \quad (10)$$

$$> \frac{D^e}{V}(A^0 - A^e + B^0 - B^e) + Vp\hat{c}.$$

Proof : $TC_0(Q^0) > TC(Q^*, G^*)$ 는 총 비용의 절감을 의미한다.

$$TC_0(Q^0) = \frac{D^0}{V}(A^0 + n^0 B^0) + Vh \text{ 이고,}$$

$$TC(Q^*, G^*) = Vh^e + \frac{D^e}{V}(A^e + n^e B^e) - \frac{(\alpha p - 1)^2}{4\beta p} - p\bar{C}$$

이므로

$$TC_0(Q^0) - TC(Q^*, G^*) = (n^0 - n^e) \left[\frac{VA^0}{d} + \frac{B^0}{V}(D^0 + D^e) \right] - \frac{D^e}{V}(A^0 - A^e + B^0 - B^e) - Vp\hat{c} + \frac{(\alpha p - 1)^2}{4\beta p} + p\bar{C} \quad (11)$$

따라서 조건 (9)가 성립하면 $TC_0(Q^0) > TC(Q^*, G^*)$ 을 만족한다. □

일반적으로 탄소배출권거래제도를 도입하는 경우 총 비용이 증가할 것으로 예상되지만 Theorem 4를 통하여 분석한 결과 특정 조건을 만족하는 경우 총 비용을 절감하는 것이 가능함을 제시하고 있다. 이와 같은 총 비용의 절감은 탄소배출권거래제도의 특성을 이용하여 직관적으로 해석하는 것이 가능하다. 최초로 할당된 배출권보다 탄소배출량이 적은 경우 잉여 배출권의 판매를 통한 이익 증대가 가능하므로 총 비용의 감소가 가능하다. 특히, Theorem 4에서 제시한 조건 식 (10)은 배출량 저감을 위한 적절한 투자를 통하여 탄소배출량이 최초 할당된 배출권보다 작아지는 경우를 나타낸다.

탄소배출권거래제도 도입에 따른 비용절감의 규모 $TC_0(Q^0) - TC(Q^*, G^*)$ 는 식 (11)에 제시된 바와 같이 총 다섯 요소로 구성되어 있다. 제일 처음 요소인 $(n^0 - n^e) \left[\frac{VA^0}{d} + \frac{B^0}{V}(D^0 + D^e) \right]$ 는 배송지역의 조정에 따른 비용의 감소를 의미하며, 두 번째와 세 번째 요소인 $\frac{D^e}{V}(A^0 - A^e + B^0 - B^e)$ 와 $Vp\hat{c}$ 는 각각 차량을 이용한 수송과정과 재고보관 과정에서 발생하는 탄소배출 비용을 의미한다. 네 번째 $\frac{(\alpha p - 1)^2}{4\beta p}$ 는 최적의 투자가 이루어지는 경우 기대되는 탄소저감의 규모이고 마지막 요소 $p\bar{C}$ 는 탄소배출권의 가치를 나타낸다. 따라서 Theorem 4의 비용절감을 위한 조건 식 (10)은 탄소배출 비용을 고려함으로써 추가적으로 증가하는 총 비용이 탄소배출량 감축에 의하여 예상되는 추가적인 이득보다 작아야함을 의미한다.

5. 결 론

본 논문에서는 탄소배출 비용이 순회배송 물류전략에 미치는 영향을 평가하기 위한 모형을 제시하였다. 순회배송 물류전략에서 단일 공급업체와 다수의 고객으로 구성된 시스템의 총 비용을 제시하고 이를 탄소배출 비용을 고려한 모형으로 확장하였다. 본 논문에서 고려한 탄소배출 비용은 탄소배출권거래제도에 의한 거래비용과 탄소저감을 위한 기업의 비용투자로 구성하였다.

본 연구에서 제안한 모형의 분석결과 $h/B^0 > h^e/B^e$ 의 조건을 만족하는 경우 탄소배출권거래제도를 도입함으로써 탄소배출량을 감축하는 것이 가능함을 확인하였다. 탄소배출량 감축과 함께 수송비용과 재고비용으로 구성된 물류비용을 절감하는 것도 가능하며 비용 절감을 위한 조건을 확인하였다. 또한 탄소배출권거래제도와 함께 탄소배출량 저감을 위한 자체적인 최적 투자 비용의 규모와 그 효과를 구조적으로 분석하였다. 본 논문에서 제시한 모형을 이용함으로써 다양한 물류환경에서 탄소배출권거래제도 하에서 순회배송 물류전략의 변화를 이해하는 것이 가능할 것이다.

본 논문의 주제와 관련하여 다음과 같은 추가 연구가 가능할 것이다. 첫째, 단일 공급업체와 다수의 고객으로 구성된 물류 시스템의 경우 본 논문에서 고려한 순회배송 물류전략에 더하여 직배송 물류전략 등을 고려할 수 있다. 따라서 본 연구를 확장하여 직배송 물류전략과 순회배송 물류전략의 장단점을 탄소배출량 저감과 비용 개선의 관점에서 비교하는 것은 흥미로운 연구주제가 될 수 있다.

둘째, 본 연구에서는 수리모형의 구조적 분석 방법만을 사용하였으나 제시된 모형을 이용한 수치실험 또는 사례연구를 수행함으로써 모형의 타당성 검증과 추가적인 결과를 도출하는 것이 가능할 것이다. 향후 본 논문에서 개발한 수리모형에서 제시한 주요 계수를 대상으로 수치실험을 수행함으로써 탄소배출 비용, 탄소저감을 위한 투자비용, 물류비용 사이의 관계와 효과적인 탄소배출 비용 대응 전

략에 관련한 정보를 확인할 수 있을 것이다. 또한 본 논문에서는 $m=n$ 을 가정하였으나 [가정 1]에서 제시한 바와 같이 $m \neq n$ 인 경우를 대상으로 추가 분석을 수행하는 것이 가능할 것이다.

마지막으로 탄소배출권거래제도 이외에 총 배출량 제약 (Cap policy)과 같이 다른 유형의 탄소저감 정책으로 모형을 확장할 수 있을 것이다. 총 배출량 제약 정책을 적용하는 경우 Theorem 2에서 도출한 최적해 $((Q^*, G^*) = (V, \frac{\alpha p - 1}{2\beta p}))$ 에 대한 수정이 요구된다. 총 배출량 제약 정책에 대한 상세 분석은 본 논문의 범위를 벗어나므로 총 배출량 제약 정책에 의하여 본 논문에서 제시한 모형 식 (4)~식 (8)의 수정 방향만을 간략하게 제시하도록 한다.

$$\text{Minimize}_{Q,G} TC^4(Q, G) \quad (12)$$

$$\text{s.t. } TC^4(Q, G) = hQ \quad (13)$$

$$+ (\gamma + cL + ck\sqrt{mn}/\rho + \sigma m) \frac{D}{Q} + G$$

$$E(Q, G) = \hat{h}Q + (\hat{c}L + \hat{c}k\sqrt{mn}/\rho) \frac{D}{Q} \quad (14)$$

$$- \alpha G + \beta G^2 \leq \bar{C}$$

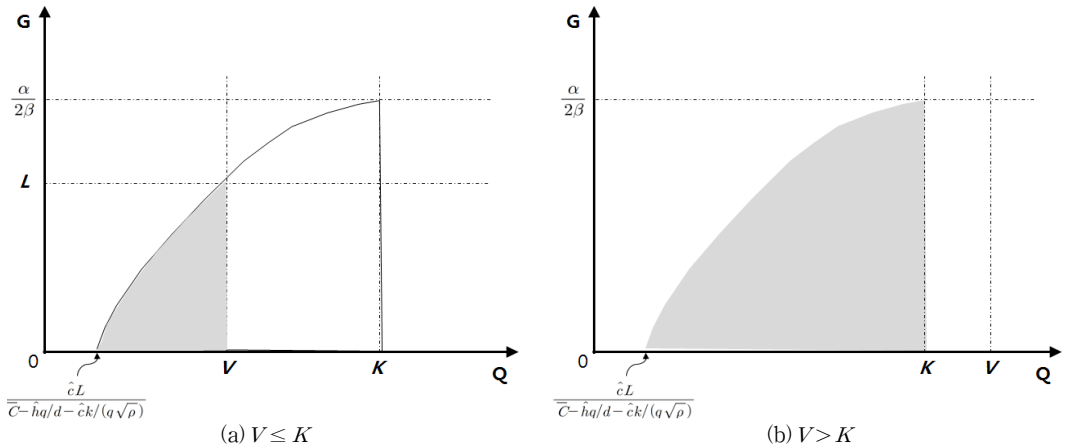
$$0 \leq Q \leq V \quad (15)$$

$$0 \leq G \leq \alpha/\beta \quad (16)$$

식 (12)~식 (16)은 총 배출량 제약을 고려한 최적화 모형이다. 식 (14)와 같이 탄소배출량은 탄소배출 허용량 \bar{C} 를 초과할 수 없다. 식 (4)~식 (8)의 경우 배송량 Q 에 대한 제약이 없으므로 Theorem 1에 의하여 $Q^* = V$ 가 성립하지만, 총 배출량 제약을 고려하는 경우 식 (14)~식 (16)에서 제시한 Q 와 G 의 가능해 영역을 고려하여 최적해를 도출하는 것이 요구된다.

식 (13)~식 (14)의 가능해 영역을 도식화하면 [그림 2]와 같다. Theorem 1과 같이 총 비용 $TC^4(Q, G)$ 는 Q 에 대하여 감소함수이므로 최적해는 주어진 G 에 대하여 가능해 영역에서 가장 큰 Q 의 값으로 결정된다.

$$\text{[그림 2](a)에서 } V \leq K = \frac{\hat{c}L}{\bar{C} - \hat{h}q/d - \hat{c}k/(q\sqrt{\rho}) + \alpha^2/4\beta}$$



[그림 2] 가능해 영역 : $K = \frac{\hat{c}L}{C - \hat{h}q/d - \hat{c}k/(q\sqrt{\rho}) + \alpha^2/4\beta}$, $L = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta[\hat{h}V + (\hat{c}L + \hat{c}k\sqrt{mn}/\rho)] \frac{D}{V} - \bar{C}}}{2\beta}$

의 경우 최적해는 $(Q^*, G^*) = (V, L)$ 이 됨을 알 수 있다. [그림 2](a)와 다르게 [그림 2](b)와 같이 $V > K$ 가 되면 최적해는 $(Q^*, G^*) = (K, \alpha/2\beta)$ 가 된다. [그림 2]를 통하여 최적 배송량과 투자액은 다음 식 (17)과 같이 결정된다.

$$(Q^*, G^*) = \begin{cases} (V, L) & \text{if } V \leq K \\ (K, \alpha/2\beta) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

총 배출량 제약 정책의 경우 탄소배출권거래제도 와 최적해 (Q^*, G^*) 가 달라지며 탄소배출량과 총 비용의 변화에 대한 추가적인 분석이 요구된다. 따라서 Theorem 3과 Theorem 4에서 제시한 탄소배출량과 총 비용의 감소여부와 규모를 재측정하는 것이 요구된다.

참고 문헌

[1] 민대기, “탄소배출권거래 비용을 고려한 직배송 물류전략의 효과성 평가”, 『한국생산관리학회지』, 제24권, 제3호(2013), pp.339-352.
 [2] 민연주, “국내외 녹색물류 제도 및 정책동향”, 기업 녹색물류체계 구축전략 세미나, 2010.

[3] 한국생산성본부, 녹색물류의 이해, 2009.
 [4] 홍운선, “온실가스 감축 규제가 중소기업에 미치는 영향에 관한 연구”, 중소기업연구원, 2010.
 [5] Andersson, H., A. Hoff, M. Christiansen, G. Hasle, and A. Løkketangen, “Industrial aspects and literature survey : Combined inventory management and routing,” *Computers and Operations Research*, Vol.37, No.9 (2010), pp.1515-1536.
 [6] Benjaapar, S., Y. Li, and M. Daskin, “Carbon footprint and the management of supply chains : Insights from simple models,” *working paper*, 2010.
 [7] Bektas, T. and G. Laporte, “The pollution-routing problem,” *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol.45, No.8(2011), pp.1232-1250.
 [8] Brar, G.S. and G. Saini, “Milk run logistics : Literature review and directions,” *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol.1(2011), London, U.K.
 [9] Burns, L.D., R.W. Hall, D.E. Blumenfeld, and C.F. Daganzo, “Distribution Strategies that

- Minimize Transportation and Inventory Costs," *Operations Research*, Vol.33, No.3(1985), pp.469-490.
- [10] Chaabane, A., A. Ramudhin, and M. Paquet, "Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme," *International Journal of Production Economics*, Vol.135 (2012), pp.37-49.
- [11] Chen, X., S. Benjaafar, and A. Elomri, "The carbon-constrained EOQ," *Operations Research Letters*, Vol.41, No.2(2013), pp.172-179.
- [12] Cholette, S. and K. Venkat, "The energy and carbon intensity of wine distribution : A study of logistical options for delivering wine to consumers," *Journal of Cleaner Production*, Vol.17(2009), pp.1401-1413.
- [13] Daganzo, C.F., "The distance traveled to visit N points with maximum of C stops per vehicle : An analytic model and an application," *Transportation Science*, Vol.18(1984), pp.331-350.
- [14] Dekker, R., J. Bloemhof, and I. Mallidis, "Operations research for green logistics-An overview of aspects, issues, contributions and challenges," *European Journal of Operational Research*, Vol.219(2012), pp.671-679.
- [15] Dowlatshahi, S., "Developing a theory of reverse logistics," *Interface*, Vol.30, No.3(2000), pp.143-155.
- [16] Fleischmann, M., J.M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. van der Laan, J. van Nunen, and L.N. Van Wassenhove, "Quantitative models for reverse logistics : A review," *European Journal of Operational Research*, Vol.103, No.1(1997), pp.1-17.
- [17] Giarola, S., N. Shah, and F. Bezzo, "A comprehensive approach to the design of ethanol supply chain including carbon trading effects," *Bioresource Technology*, Vol.207(2012), pp. 175-185.
- [18] Hoen, K.M.R., T. Tan, J.C. Fransoo, and G.J. van Houtum, "Effect of carbon emission regulations on transport mode selection under stochastic demand," *Flexible Service and Manufacturing Journal*, Vol.26, No.1/2(2014), pp.170-195.
- [19] Hua, G., T.C.E. Cheng, and S. Wang, "Managing carbon footprints in inventory management," *International Journal of Production Economics*, Vol.132(2011), pp.178-185.
- [20] Huang, M.H. and R.T. Rust, "Sustainability and consumption," *Journal of the Academy of Marketing Science*, Vol.39, No.1(2011), pp. 40-54.
- [21] IPCC, *Guideline for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006.
- [22] Lin, C., K.L. Choy, G.T.S. Ho, S.H. Chung, and H.Y. Lam, "Survey of Green Vehicle Routing Problem : Past and future trends," *Expert Systems with Applications*, Vol.41 (2014), pp.1118-1138.
- [23] Merrick, R.J. and J.H. Bookbinder, "Environmental assessment of shipment release policies," *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol.40, No.10(2010), pp.748-762.
- [24] Pillac, V., M. Gendreau, C. Guéret, and A. Medaglia, "A review of dynamic vehicle routing problems," *European Journal of Operational Research*, Vol.225, No.1(2013), pp.1-11.
- [25] Rizet, C., M. Browne, E. Cornelis, and J. Leonard, "Assessing carbon footprint and energy efficiency in competing supply chains : Review-Case studies and benchmarking," *Transportation Research Part D*, Vol.17(2012), pp. 293-300.

- [26] Stein, D.M., "Scheduling Dial-a-Ride transportation systems," *Transportation Science*, Vol.12(1978), pp.232-249.
- [27] Toptal, A., H. Ozlu, and D. Konur, "Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations," *International Journal of Production Research*, Vol.52, No.1(2014), pp. 243-269.
- [28] World Economic Forum/Accenture, "Supply chain decarbonisation : the role of logistics and transport in reducing supply chain carbon emissions," Geneva, 2009.
- [29] WRI/WBCSD, *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*, 2004.
- [30] Zhang, B. and L. Xu, "Multi-item production planning with carbon cap and trade mechanism," *International Journal of Production Economics*, Vol.144, No.1(2010), pp.118-127.