

Single Manufacturer and Multiple Retailers Multi-Product Inventory Model under Cap-and-Trade Mechanism

Dae-Hong Kim[†]

Department of Industrial & Management Engineering, Hansung University

배출권거래제 하에서 단일 제조업자-다소매업자의 공급사슬에서 다품목의 재고모형

김 대 홍[†]

한성대학교 산업경영공학과

In pursuing carbon emission reduction efforts, companies have focused for the most part on reducing emissions due to the more efficient equipment and facilities. However they overlook a significant source of carbon emissions, one that is driven by operational policies. Currently companies are looking for solutions to reduce carbon emissions associated with their operations. Operational adjustments, such as modifications in order quantities could an effective way in reducing carbon emissions in the supply chain. Also, Cap-and-Trade mechanism is generally accepted as on of the most effective market-based mechanism to reduce carbon emissions. In this paper, we investigate a supply chain with single manufacturer and multiple retailers multi-product inventory model under the cap-and-trade system incorporating the carbon emissions caused by transportation and warehousing activities. Also, we provide an iterative solution algorithm and derive the common order interval and the number of intervals for each product. We show by numerical example that the inventory model incorporating cap & trade mechanism can reduce total cost and carbon emissions compared to the classical inventory model. Using the numerical examples, we also investigates different carbon price on the performance of the inventory model.

Keywords : Carbon Footprints, Cap-and-Trade Mechanism, Multi-Product, Supply Chain

1. 서 론

1차 산업혁명 이후 화석연료의 사용의 급격한 증가로 지구의 기후변화는 과거의 자연적인 기후변화와는 달리 지나치게 빠른 속도로 진행되고 있다. 특히 이런 환경문제 가운데 가장 심각하고 해결이 곤란하며, 경제활동에 큰 영향을 미치고 있는 것이 지구온난화이다. 지구온난화는 생태계와 인류의 생존에 위협이 되는 심각한 문제이며, 이산화

탄소(56%), 메탄(14%), 염화불화탄소(22%), 질소산화물(8%) 등 온실효과(greenhouse effect)를 일으키는 가스물질의 대기 중 농도가 상승함에 따라 발생하는 현상으로 알려져 있다. 이런 온실가스를 줄이기 위하여 전 지구적인 노력은 진행이 되고 있으며, 이러한 온난화 문제에 대응하기 위한 노력으로는 기후변화에 관한 유엔 기본협약(UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change)이 있다. 이 협약의 목적으로는 증가 일로에 있는 지구의 대기 중 온실가스 농도를 억제하여 일정기간 내에 인위적으로 발생하는 기후변화를 방지하는데 그 목적이 있다[8].

기후변화협약의 구체적 이행방안으로는 교토의정서(Kyoto Protocol)와 파리협정이 있다. 교토의정서는 주요선진국 37

개국이 참여하여 지구온난화의 방지를 위한 기후변화협약의 구체적 이행방안으로 2005년에 발효되었다. 교토의정서에서는 각국 정부가 경제적 수단을 통하여 감축의무를 이행할 수 있도록 독려하고 있으며, 여기에는 탄소배출권거래제도가 포함되어 있다. 2015년도에 합의된 파리협정은 2020년 만료 예정인 교토의정서를 대체하여, 2020년 이후의 기후변화 대응을 담은 국제협약이다. 파리협정은 37개의 선진국만 온실가스 감축 의무가 있었던 교토의정서와 달리 195개 당사국 모두에게 구속력 있는 보편적인 첫 기후협약이라는 점에서 그 역사적인 의미를 가지고 있다. 우리나라는 2030년까지 온실가스를 전망치보다 37% 줄이겠다고 약속하였다.

탄소 배출권 거래제(Emission Trading System, ETS)란 각 국가가 개별 기업별로 허용 탄소 배출량을 미리 할당하여준 뒤 할당량에 따라 탄소 배출권 거래소에서 배출권을 사고 팔 수 있도록 한 제도이다. 배출허용량을 초과하여 온실가스를 배출한 기업과 배출허용량에 미달하여 배출한 기업이 부족분과 잉여분을 시장가격으로 서로 매매하는 제도인 것이다[8].

기업 간에 배출권거래제가 실시되면 온실가스 배출권을 추가로 구입한 기업은 구입분 만큼 온실가스의 추가배출이 허용되고, 배출권을 판매한 기업은 그만큼 배출을 줄여야 한다. 따라서 배출량이 많은 기업은 배출권 구입에 소요되는 비용절감을 위해 배출량을 삭감하게 되고, 배출량이 적은 기업은 배출권 판매로 얻는 수익을 높이기 위해 온실가스 배출 저감에 힘쓰게 된다. 이와 같이 배출권거래제는 배출권을 사고팔 수 있도록 시장을 개설함으로써 시장기능을 이용하여 자율적으로 저감목표를 달성하도록 하는 방법이다.

2016년도 우리나라의 온실가스 배출량은 6.9억 톤으로 세계 5위 수준이며, 우리나라는 『온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률』에 근거하여 2015년 1월부터 한국거래소에서 전국 단위의 배출권거래제를 도입하여 운영해 오고 있다.

정부의 탄소배출에 대한 규제에 대응하기 위한 한 가지 방법으로 기업들은 보다 에너지효율 등급이 높은 기계설비의 사용 및 연비가 높은 운송차량의 도입을 하고 있다. 또 다른 대응방안으로는 탄소배출을 줄이기 위하여 생산관리, 물류 및 재고관리 측면에서 발주량이나 1회 운송량을 변경하여 재고관리나 물류관련비용을 고려하면서 동시에 탄소배출량을 줄이는 방법을 모색하는 것이다. 최근의 환경요인을 고려한 연구에서는 생산관리나 물류관리에 대한 고려를 하여, 기업의 비용을 줄이면서 동시에 탄소배출량을 감축시킬 수 있음을 입증하였다[1, 2, 7].

Benjaafar, Li 및 Daskin[2]의 연구에서는 생산관리나 물류관리 측면에 대한 정책적 고려가 에너지 효율 등급이

높은 기계설비의 도입보다 적은 비용 또는 비용의 투입이 없이 탄소배출을 줄일 수 있음을 보였다.

Hua, Cheng 및 Wang[7]은 수요가 확정적인 EOQ모형에서 배출권거래제 하에서 운송활동 및 재고를 보유하는 과정에서 발생하는 탄소배출관련비용을 고려한 수학적 모형을 수립하였으며, EOQ모형에서 총비용을 줄이면서 동시에 탄소배출량을 관리할 수 있음을 수학적으로 분석하였다.

Bonney와 Jaber[3]는 경제적 발주량(EOQ) 모형에 운송과정에서 발생하는 환경관련 비용뿐만 아니라 반품으로 인하여 발생하는 환경비용을 고려하여 수학적 모형을 수립하고, 최적해의 성격에 대하여 분석하였다. 또한 제품의 1회 운송량을 증가시키고 운송횟수를 줄이는 것이 발주비용이나 탄소배출량을 줄일 수 있음을 수학적으로 증명하였다.

Bouchery, Ghaffari, Jemai 및 Dallery[4]는 환경에 영향을 미치는 모든 요소들을 수학적으로 계량화하여 하나의 목적함수로 나타내는 것은 바람직하지 않은 것으로 생각하여 전통적인 경제발주량(EOQ)모형을 다목적 함수의 문제(multi-objective problem)로 계량화하였고, 이를 지속가능 발주량(Sustainable Order Quantity-SOQ)이라고 하였다. 또한 위의 분석을 더 복잡한 다단계의 공급사슬로 확장하는 연구도 수행하였다.

Chen, Benjaafar 및 Elomri[5]는 물류 및 운영관리 정책을 통하여 총비용을 크게 증가시키지 않으면서 동시에 탄소배출을 줄이는 방안에 대한 연구를 하였으며, 발주량을 변경하여 탄소배출량을 줄일 수 있는 수학적 조건에 대한 분석적인 연구를 수행하였다. 또한 배출권거래제 뿐만 아니라 탄소세 하에서의 경제발주량에 대한 연구도 수행하였다.

환경요인을 고려한 공급사슬에 관한 국내의 연구로는 Kim[12]이 있으며, 앞의 선행연구들을 확장하여 탄소배출권 거래제 하에서 공급사슬에서의 통합재고모형에 관한 연구를 수행하였으며 수학적 모형의 복잡성으로 단일 품목에 대한 연구로 한정하였다.

Kim[13]의 연구에서는 선행연구들을 확장하여 탄소배출권 거래제 하에서 다품목의 재고모형에 대한 연구로 확장하였으며, 모형의 복잡성으로 단일 제조기업에 대한 분석적인 연구로 한정하였다.

본 논문에서는 탄소배출권 거래제 하에서 단일 제조업자와 다소매업자를 포함하는 공급사슬에 대한 연구이며, 단일 제조업자가 각 완제품을 각 품목별 주기로 제조하여 소매업자에게 공동운송기간마다 운송하는 경우로, 소매업자와 제조업자를 포함하는 2단계 공급사슬의 통합재고모형을 수립하고자 한다. 수학적 모형에 포함된 관련 비용요소로는 각 완제품의 운송 시 마다 수반되는

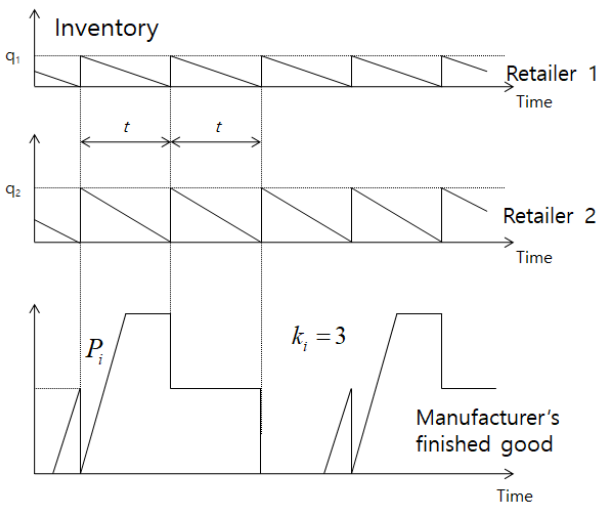
운송과 관련한 탄소배출량을 고려하였다. 그리고 각 완제품의 발주비용 및 재고유지비용 및 재고보관에 따르는 탄소배출량을 고려하였다.

2. 재고모형의 분석

본 논문은 다완제품에 대한 연구로, 각 품목별 수요가 확정적인 경우를 다루며, 따라서 각 완제품 품목별 안전재고는 둘 필요가 없다.

단일 제조업자는 각 품목별로 1회 운송량의 k_i 배(의사결정변수)를 생산하여(단일 제조업자의 1회 생산량은 Q_i) k_i 회에 나누어서 다빈도 소량으로 t 기간마다 정기적으로 소매업자들에게 공동으로 운송한다. 이때에 발주시마다 고정된 발주비용 및 운송비용(A_R)이 소요된다.

<Figure 1>은 제조업자가 두 개의 소매상에 품목을 공급하며 $k_i = 3$ 인 경우이다. 즉, 1회 운송량의 3배를 생산하여, 3회에 나누어서 두 소매업자에게 운송되는 경우로, 제조업자와 소매상의 특정 완제품의 재고수준의 변화를 나타낸다.



<Figure 1> Inventory-Time Plots for the Retailers and Manufacturer

기호정의

- D_i : 완제품 i 의 연간수요량(각 소매업자의 완제품 i 의 연간수요의 합계)
- P_i : 제조업자의 완제품 i 의 연간생산율 ($P_i > D_i$)
- A_R : 소매업자의 완제품 1회 공동발주 및 운송비용
- H_i : 소매업자의 완제품 i 의 단위당 연간 재고유지비용 (모든 소매업자에게서 동일하게 발생한다는 가정)
- S_i : 제조업자 완제품 i 의 1회 생산준비비용

- h_i : 제조업자 완제품 i 의 단위당 연간 재고유지비용
- t : 소매업자에게 발송되는 공동발주주기(의사결정변수)
- k_i : 제조업자의 완제품 i 의 1회 생산량을 결정하는 의사결정변수로 소매상에 공급하는 1회 발송량의 정수배
- Q_i : 제조업자의 완제품 i 의 1회 생산량($Q_i = k_i D_i t$)
- t^o : 탄소배출거래제를 고려하지 않을 때의 최적공동발주주기
- t^* : 탄소배출거래제 하에서의 최적공동발주주기
- \hat{t} : 탄소배출량을 최소화하는 최적공동발주주기
- α : 연간 탄소배출량 허용한도(톤)
- C : 톤당 탄소가격
- X : 연간 탄소거래량
- $JTC(t, \bar{k})$: 공동발주주기가 t , 각 완제품별 발주배수가 \bar{k} 일 때의 연간 통합총비용

필요한 기본가정은 전통적 경제적 발주량(EOQ) 모형처럼 다음과 같다.

- (1) 각 완제품의 수요는 일정하고 확정적이다.
- (2) 각 완제품의 조달기간(lead time)은 일정하고 알려져 있다.
- (3) 각 완제품의 1회 발주당 발주비용과 단위당 연간재고유지비용은 고정되어 있다.
- (4) 각 완제품의 품질은 허용하지 않으며 따라서 품질비용은 고려할 필요가 없다.
- (5) 1회 운송관련 탄소배출량은 운송 시 마다 발생하는 고정 배출량과 운송량에 정비례하는 변동배출량의 합이다.
- (6) 각 완제품 재고를 보관 하는 데 따르는 탄소배출량은 보관량에 관계없이 발생하는 고정 배출량과 보관량에 정비례하는 변동배출량의 합이다.

(5)~(6)번의 탄소배출량에 관한 가정은 탄소배출에 관한 선행연구인 Hua, Cheng, Wang[7], Hovellaque 및 Bironneau [6] 그리고 Marintek, Trondheim[14]의 연구에서의 가정 사항과 동일하다.

2.1 탄소배출을 제외한 다품목 재고모형

소매업자에게서 발생하는 비용은 완제품 발주비용과 완제품 재고유지비용이다. 모든 소매업자는 정기적으로 공동발주주기인 t 기간에 한 번씩 완제품 i 를 $D_i t$ (모든 소매업자의 발주량의 합계)개를 발주하며, 제조업자는 완제품 i 를 1회에 $Q_i = k_i D_i t$ 개를 생산하여 k_i 회에 나누어 정기적으로 t 기간마다 소매업자에게 발송한다. 소매업자의 연간 발주(발송)횟수는 $1/t$ 이며 완제품 i 의 평균재고량은 $D_i t/2$ 이다. 따라서 소매업자의 연간총비용은 다음과 같다[11].

$$\frac{A_R}{t} + \sum_{i=1}^n \frac{H_i D_i t}{2} \quad (1)$$

제조업자에게서 발생하는 비용은 완제품 생산준비비용, 완제품 재고유지비용이다. 제조업자는 소매업자로부터 품목 i 의 주문을 받아서 완제품의 생산준비를 하여 정기적으로 $k_i t$ 마다 생산준비를 하여 1회에 $k_i D_i t$ 개를 생산하며, 이를 k_i 번에 나누어 소매업자에게 운송하게 된다. 이때의 제조업자에게서 발생하는 완제품의 연간 생산준비비용과 재고유지비용은 다음과 같다[9, 10, 11].

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{S_i}{k_i t} + \frac{h_i D_i t}{2} \left\{ (2 - k_i) \frac{D_i}{P_i} + k_i - 1 \right\} \right] \quad (2)$$

소매업자의 총비용, 제조업자의 총비용을 더하면 공급사슬 전체의 통합총비용(TC)이 되며, 결과는 아래와 같다.

$$TC(t, \bar{k}) = \frac{A_R}{t} + \sum_{i=1}^n \frac{H_i D_i t}{2} + \sum_{i=1}^n \left[\frac{S_i}{k_i t} + \frac{h_i D_i t}{2} \left\{ (2 - k_i) \frac{D_i}{P_i} + k_i - 1 \right\} \right] \quad (3)$$

총비용을 최소화하는 t 를 구하기 위하여 위의 식 (3)을 t 에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$t = \sqrt{\frac{2 \left\{ A_R + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{k_i} \right\}}{D_i \left[H_i + h_i \left\{ (2 - k_i) \frac{D_i}{P_i} + (k_i - 1) \right\} \right]}} \quad (4)$$

주어진 t 에 대하여 통합총비용을 최소화하는 k_i 을 구하기 위하여 통합총비용을 k_i 에 대하여 편미분하여 0으로 두고 정리하면 다음과 같다.

$$k_i = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{2S_i}{h_i D_i (1 - \frac{D_i}{P_i})}} \quad (5)$$

통합총비용을 최소화하는 완제품의 공동발주주기(t), 제조업자가 각 품목별로 1회 운송량의 몇 배를 생산하여야 하는 가를 결정하는 의사결정변수(\bar{k})를 구하는 것은 의사결정변수가 $n+1$ (n 은 완제품 품목의 수)개인 비선형 정수계획법 문제로 최적해를 구하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 반복적인 방법으로 쉽게 해를 찾는 발견적 해법(heuristic method)을 이용하는데 초점을 맞추고자 한다[10, 11].

(단계 1) t 의 초기치를 구하기 위하여 식 (4)에 $k_i = 1$ ($i = 1, 2, \dots, n$)을 대입하여 t 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$t^o = \sqrt{\frac{2(A_R + \sum_{i=1}^n S_i)}{\sum_{i=1}^n D_i \left(H_i + h_i \frac{D_i}{P_i} \right)}}$$

주어진 t 로 식 (5)를 이용하여 \bar{k} 의 초기치를 계산한다.

(단계 2) 주어진 \bar{k} 로 식 (4)에 대입하여 t 값을 계산한다.

(단계 3) 주어진 t 값으로 식 (5)에 대입하여 \bar{k} 값을 계산한다.

(단계 4) t, \bar{k} 값이 수렴할 때까지 (단계 2)에서 (단계 3)과정을 반복한다. 해가 수렴하면 \bar{k} 을 정수로 반올림하여 계산한다.

2.2 탄소배출에 대한 분석

탄소배출량은 앞에서 제시한 가정사항 (5)~(6)을 이용하여 계산 할 수 있다.

e_0 를 1회 공동운송과 관련한 고정탄소배출량, e_i 를 완제품 i 의 1회 운송과 관련한 변동탄소배출계수라 가정하자. 공동발주간격인 시간 t 마다 품목을 공동운송하게 되어서 e_0 만큼의 고정 탄소배출량이 발생하며, 각 완제품 품목별로는 시간 t 마다 $D_i t$ 만큼 운송하게 되어서 $D_i t e_i$ 만큼의 추가 변동 탄소배출량이 발생한다. 따라서 연간(단위 시간 당) 운송관련 탄소배출량을 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{e_o}{t} + \sum_{i=1}^n \frac{D_i t e_i}{t} = \frac{e_o}{t} + \sum_{i=1}^n D_i e_i \quad (6)$$

소매상에서 완제품 i 의 평균재고량은 $\frac{D_i t}{2}$ 이다. 소매상의 품목별 재고보관과 관련한 고정 배출량을 F_i , 보관량에 정비례하는 변동배출계수를 G_i 라고 가정하면, 단위 시간 당 재고보관 관련 연간 탄소배출량은 가정사항 (6)에 의하여 다음과 같이 정리된다.

$$\sum_{i=1}^n \left(F_i + \frac{G_i D_i t}{2} \right) \quad (7)$$

제조업자에서 완제품 i 의 평균재고량은 다음과 같다 [9, 10, 11].

$$\frac{D_i t}{2} \left\{ (2 - k_i) \frac{D_i}{P_i} + (k_i - 1) \right\}$$

제조업자의 품목별 재고보관과 관련한 고정 배출량을 g_0 , 보관량에 정비례하는 완제품 i 의 변동배출계수를 g_i 라고 가정하면, 제조업체에서 단위기간 당 재고관련 탄소배출량은

$$g_0 + \sum_{i=1}^n \left[\frac{g_i D_i t}{2} \left\{ (2-k_i) \frac{D_i}{P_i} + (k_i - 1) \right\} \right] \quad (8)$$

연간탄소배출량은 식 (6), 식 (7)과 식 (8)을 합하면 되며, 그 결과는 다음과 같다.

$$CF(t, \bar{k}) = \frac{e_0}{t} + \sum_{i=1}^n \frac{G_i D_i t}{2} + \sum_{i=1}^n \left[\frac{g_i D_i t}{2} \left\{ (2-k_i) \frac{D_i}{P_i} + (k_i - 1) \right\} \right] \quad (9)$$

$$+ \left(\sum_{i=1}^n D_i e_i + \sum_{i=1}^n F_i + g_0 \right)$$

만약 위의 분석에서 소매상에서의 탄소배출량을 고려하지 않고 제조업자의 탄소배출량만으로 고려하고자 한다면 위의 식에서 $G_i = 0 (i=1, 2, \dots, n)$ 로 두면 된다.

연간 탄소배출량 $CF(t, \bar{k})$ 을 최소화하는 공동발주주기, t 를 구하기 위하여 식 (9)를 t 에 대하여 편미분하여 0으로 두어 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{t} = \sqrt{\frac{2e_0}{\sum_{i=1}^n D_i [G_i + g_i \{ (2-k_i) D_i / P_i + (k_i - 1) \}]} \quad (10)$$

연간 탄소배출량 $CF(t, \bar{k})$ 을 최소화하는 k_i 를 구하기 위하여 식 (9)를 k_i 에 대하여 편미분하면 다음과 같다.

$$\frac{g_i D_i t}{2} \left(1 - \frac{D_i}{P_i} \right)$$

$P_i > D_i$ 이므로, 위의 식은 항상 0보다 크며, 이는 위의 식이 k_i 에 대하여 증가함수라는 의미이다. 따라서, k_i 값 중에서 가장 작은 정수값인, $k_i = 1 (i=1, 2, \dots, n)$ 일 때 연간 탄소배출량이 최소화된다. 위의 $\bar{k} = 1$ 을 식 (10)에 대입하여 t 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{t} = \sqrt{\frac{2e_0}{\sum_{i=1}^n D_i (G_i + g_i D_i / P_i)} \quad (11)$$

2.3 탄소배출을 고려한 통합재고모형

배출권 거래제에서는 기업별로 배출량 한도(Cap)를 개별기업에 분배하며 이를 기준으로 초과분이나 여유분만큼을 배출권 거래시장에서 배출권으로 거래하는 방식이다.

탄소배출권 거래제 하에서는 기업들은 배출한도를 초과 달성한 탄소배출량($X > 0$)을 배출권 거래시장에서 판매하거나 또는 배출한도를 달성하지 못한 만큼의 탄소배출량을 배출권 거래시장에서 구입할 수도 있으며($X < 0$), 따라서 탄소배출권 거래제 하에서의 연간 통합총비용은 다음과 같다.

$$JTC(t, \bar{k}) = TC(t, \bar{k}) - CX \quad (12)$$

연간 탄소배출량한도가 α 이므로 다음의 관계식이 도출된다.

$$CF(t, \bar{k}) + X = \alpha \quad (13)$$

식 (9)를 이용하여 위의 식 (13)을 정리하면 다음과 같다.

$$X = \left(\alpha - g_0 - \sum_{i=1}^n D_i e_i - \sum_{i=1}^n F_i \right) - \frac{e_0}{t} - \sum_{i=1}^n \frac{G_i D_i t}{2}$$

$$- \sum_{i=1}^n \left[\frac{g_i D_i t}{2} \left\{ (2-k_i) \frac{D_i}{P_i} + (k_i - 1) \right\} \right]$$

$\alpha' = \alpha - g_0 - \sum_{i=1}^n D_i e_i - \sum_{i=1}^n F_i$ 로 두고 위의 식을 X 에 대하여 정리하면 다음과 같다(기호의 복잡성으로 뒤의 식에서는 $\alpha = \alpha'$ 로 두었다).

$$X = \alpha - \frac{e_0}{t} - \sum_{i=1}^n \frac{G_i D_i t}{2} - \sum_{i=1}^n \left[\frac{g_i D_i t}{2} \left\{ (2-k_i) \frac{D_i}{P_i} + (k_i - 1) \right\} \right]$$

위의 식을 식 (12)에 대입하면 다음의 탄소배출권 거래제 하에서의 연간 통합총비용이 계산된다.

$$JTC(t, \bar{k}) = \frac{A_R + C e_0 + \sum_{i=1}^n S_i / k_i}{t} + t \sum_{i=1}^n \frac{(H_i + C G_i) D_i}{2} \quad (14)$$

$$+ t \sum_{i=1}^n \left[\frac{(h_i + C g_i) D_i}{2} \left\{ (2-k_i) \frac{D_i}{P_i} + (k_i - 1) \right\} \right]$$

$$- C \alpha$$

연간 통합총비용인 식 (14)을 관찰하면 연간 탄소배출량허용한도(α)가 증가하면 연간 통합총비용은 감소함을 알 수 있다.

주어진 \bar{k} 하에서 통합총비용 $JTC(t, \bar{k})$ 를 t 에 대하여 두 번 편미분하면 아래와 같다.

$$\frac{\partial^2 JTC(t, \bar{k})}{\partial t^2} = \frac{2(A_R + C e_0 + \sum_{i=1}^n S_i / k_i)}{t^3}$$

기간 t 는 항상 양수이므로 위의 값은 항상 0보다 크며, 따라서 주어진 \bar{k} 하에서 통합총비용은 t 에 대하여 볼록 (convex) 함수이다.

위의 통합총비용 $JTC(t, \bar{k})$ 를 t 에 대하여 편미분하여 0으로 두고 t 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

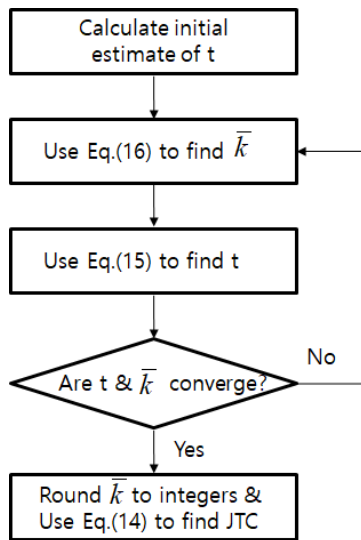
$$t^* = \sqrt{\frac{2(A_R + Ce_0 + \sum_{i=1}^n S_i/k_i)}{\sum_{i=1}^n D_i[(H_i + CG_i) + (h_i + Cg_i)\{(2 - k_i)D_i/P_i + (k_i - 1)\}]}} \quad (15)$$

주어진 t 에 대하여 통합총비용을 최소화하는 k_i 를 구하기 위하여 통합총비용을 k_i 에 대하여 편미분하여 0으로 두고 k_i 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$k_i^* = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{2S_i}{(h_i + Cg_i)D_i(1 - D_i/P_i)}} \quad (16)$$

만약 위의 식 (15)와 식 (16)에서 $C = 0$ 을 대입하면, 식 (15)와 식 (16)은 각각 식 (4), 식 (5)와 동일하여 진다. 즉, 톤당 탄소가격이 공짜이면, 제 2.1절의 탄소배출을 제외한 전통적 재고모형과 같아진다. 만약 식 (15)에서 $C = \infty$ 을 대입하면, 식 (15)는 식 (10)과 동일하다. 즉, 톤당 탄소가격이 매우 비싸지면, 궁극적으로는 연간 탄소배출량을 최소화해야 함을 알 수 있다.

통합총비용을 최소화 하는 t, \bar{k} 을 찾는 것은 비선형 혼합 정수계획법(mixed integer programming) 문제로 매우 어렵다. 본 연구에서는 최적해보다는 쉽게 해를 구하는 발견적 해법(Heuristic method)을 찾는데 연구의 초점을 두었으며 아래의 <Figure 2>의 발견적 해법을 이용하여 해를 구할 수 있다. 해의 계산은 엑셀과 같은 스프레드시트에서도 간단히 계산가능하다.



<Figure 2> Iterative Algorithm

<Figure 2>에서 t 의 초기치를 구하기 위하여 $k_i = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 을 식 (15)에 대입하여 t 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$t = \sqrt{\frac{2(A_R + Ce_0 + \sum_{i=1}^n S_i)}{\sum_{i=1}^n D_i\left\{(H_i + CG_i) + (h_i + Cg_i)\frac{D_i}{P_i}\right\}}}$$

3. 탄소배출을 고려한 통합재고모형의 예제

탄소배출을 고려한 다품목의 통합재고모형의 유용성을 보이기 위하여 선행연구[7]에서 사용한 예제의 수치를 본 연구에 맞게 수정하여 재고정책을 유도해 보도록 하겠다.

3.1 수치예 1-단일완제품인 경우

- 제조업자의 연간생산율 $P_1 = 60,000$ 개/년,
- 완제품의 연간수요량 $D_1 = 40,000$ 개/년,
- 소매업자의 완제품 1회 발주비용 $A_R = \$500$ /회,
- 소매업자의 완제품 재고유지비용 $H_1 = \$40$ /개/년,
- 제조업자 완제품 1회 생산준비비용 $S_1 = \$1,000$ /회,
- 제조업자 완제품 재고유지비용 $h_1 = \$20$ /개/년,
- 소매업자의 완제품 단위당 고정배출량 $F_1 = 20$ 톤/년
- 소매업자의 완제품 단위당 변동배출량 $G_1 = 3$ 톤/년,
- 제조업자의 완제품의 고정배출량 $g_0 = 10$ 톤/년
- 제조업자의 완제품 단위당 변동배출량 $g_1 = 2$ 톤/년,
- 트럭 1회 운송 시 고정 탄소배출량 $e_0 = 100$ 톤
- 트럭 1회 운송 시 변동 탄소배출량 $e_1 = 0.1$ 톤
- 단위당(톤당) 탄소가격 $C = \$5$
- 연간 탄소배출량 한도관련 입력자료 $\alpha = 10,000$ 톤

위의 자료를 이용하여 반복적 해법에 의하여 해를 구한 결과가 아래의 <Table 1>에 나와 있다.

<Table 1> Results of Iteration Method

No	t	k_1	JTC	Carbon Emission
1	0.03651	1.937	\$53,137.03	10,389.19(ton)
2	0.02998	2.359	50,613.84	10,506.90
3	0.02835	2.494	50,412.64	10,579.14
4	0.02791	2.534	50,396.72	10,602.49
5	0.02778	2.545	50,395.39	10,609.72
6	0.02775	2.548	50,395.31	10,611.41
7	0.02774	2.549	50,395.30	10,611.98
8	0.02774	2.549	50,395.30	10,611.98

<Table 1>에서 알 수 있듯이 반복적 해법을 수치 예 1에 적용하면, 모두 8번을 반복하면 해가 수렴하는 것을 알 수 있다. 의사결정변수인 k_1 가 정수이어야 하므로 수렴한 해를 반올림하면 $k_1^* = 3$ 이며, 이를 식 (14)에 대입하면 $t^* = 0.02649$ 가 된다. 이때의 통합총비용은 식 (14)를 이용하면 \$ 50,664.46이다. 이때의 연간 탄소배출량은 (9)식을 이용하면 10,807.21톤이다.

앞에서 제시한 반복적 해법은 발견적 해법(heuristic method)이므로, 이 방법으로 구한 해가 최적해라는 보장은 없으며, 또한 이 해법으로 구한 해가 얼마나 최적해에 근접한지 알지 못한다. 따라서 이 반복적 해법이 최적해에 근접한 또는 최적해와 동일한 해를 찾을 수 있다는 것을 보여주기 위해서는 일단 수치예의 최적해를 알 수 있어야 한다. 최적해를 구하는 일반적 해법을 도출하기는 어렵지만 의사결정변수인 k_1 이 정수라는 특성을 이용하여 k_1 의 모든 정수를 나열하고 각각에 대하여 완제품의 최적 발주주기와 이때의 통합총비용을 계산할 수 있다. 나열된 통합총비용 중에서 최소가 되는 해를 탐색하면 이것이 최적해가 되며 이 최적해를 앞에서 반복적 해법으로 구한 해와 비교할 수 있다.

수치 예에서 양의 정수 중 최적 k_1 의 대상이 되는 값으로 $k_1 = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 으로 좁히면 총 6가지의 해가 나열되며 6가지에 대하여 완제품의 최적 발주주기를 구한 후 이때의 통합총비용을 계산하였으며 그 결과가 <Table 2>에 나와 있다. 통합총비용을 최소화하는 최적해를 구한 결과 통합총비용은 \$50,664.46이 나왔다. 즉 나열해에 의해 구한 최적해는 반복적 해법으로 구한 해와 정확히 일치하였다.

<Table 2> Enumeration for the Example 1

k_1	t	JTC	Carbon Emission
1	0.03651	\$59,544.51	9,933.18(ton)
2	0.02970	50,995.05	10,367.00
3	0.02649	50,664.46	10,807.21
4	0.02440	52,469.51	11,219.03
5	0.02284	55,071.40	11,605.88
6	0.02160	58,012.35	11,971.63

반복적 해법은 항상 최적해를 구할 수 있다는 보장은 없지만 수치예 1에 대하여 반복적 해법으로 해를 손쉽게 구하면서 동시에 통합총비용 면에서 최적해와 동일하다는 것을 보여 주고 있다.

3.2 수치예 2-다완제품인 경우

아래의 <Table 3>의 입력자료는 제조업자가 3가지 완제품을 생산하여 소매상에 공급하는 경우로 각 품목별 자료는 다음의 표와 같다.

<Table 3> Data for the Multi-Product Case

Data	1	2	3
P_i	60,000	80,000	50,000
D_i	40,000	40,000	20,000
H_i (\$)	40	10	30
S_i (\$)	800	1,200	500
h_i (\$)	20	20	10
e_i (\$)	0.1	0.1	0.2
F_i (\$)	20	15	10
G_i (\$)	3	2	2
g_i (\$)	2	1	1

기타 입력자료는 아래와 같다.

- 트럭 1회 운송 시 고정 탄소배출량 $e_0 = 100$ 톤
- 제조업자의 완제품의 고정배출량 $g_0 = 10$ 톤/년
- 톤당 탄소가격 $C = \$20$
- 연간 탄소배출량 한도관련 입력자료 $\alpha = 10,000$ 톤

수치 예 2에 반복적 해법을 적용하면 모두 6번을 반복하면 해가 수렴하는 것을 알 수 있으며, 그 결과가 <Table 4>에 나와 있다.

<Table 4> Results of Iteration Method for the Numerical Example 2

No	t	k_1	k_2	k_3	JTC
1	0.03044	1.46916	1.79935	1.73143	\$92,176.9
2	0.02674	1.67245	2.04833	1.97100	87,002.0
3	0.02610	1.71346	2.09855	2.01933	86,388.0
4	0.02599	1.72071	2.10744	2.02788	86,292.2
5	0.02597	1.72204	2.10906	2.02944	86,275.1
6	0.02597	1.72204	2.10906	2.02944	86,275.1

의사결정변수인 k_i 가 정수이어야 하므로 각각을 반올림하면 $k_1^* = 2, k_2 = 2, k_3 = 2$ 이 된다. 이때의 통합총비용은 \$ 87,372.05이며 <Table 5>에 최종 결과가 요약되어 있다.

<Table 5> Results of Numerical Example 2

	Item 1	Item 2	Item 3
k_i^*	2	2	2
t^*	0.02656		
JTC	\$87,372.05		
Carbon Emission	20,866.46(ton)		

수치예 2에서도 반복적 해법에서 계산된 해가 최적해 또는 최적해에 가까운 해인가를 파악하기 위하여 수치예 1에서와 같은 방법으로 나열해를 탐색하여 최적해를 구하였

으며, 그 결과가 <Table 6>에 나와 있다. 앞의 반복적 해법에 계산한 해와 비교한 결과 서로 일치하여 반복적 해법에서 구한 해가 최적해임을 알 수 있다.

<Table 6> Results of Enumeration for the Example 2

No	k_1	k_2	k_3	t	JTC
1	1	1	1	0.03044	\$105,568.33
2	1	1	2	0.02909	102,522.73
3	1	1	3	0.02833	104,786.27
4	1	2	1	0.02734	96,317.40
5	1	2	2	0.02605	91,753.32
6	1	2	3	0.02536	93,137.06
7	1	3	1	0.02572	99,379.36
8	1	3	2	0.02449	93,938.78
9	1	3	3	0.02385	94,842.34
10	2	1	1	0.03166	105,835.99
11	2	1	2	0.03008	101,426.72
12	2	1	3	0.02918	102,884.75
13	2	2	1	0.02805	93,375.78
14	2	2	2	0.02656	87,372.05
15	2	2	3	0.02576	87,949.39
16	2	3	1	0.02616	94,595.93
17	2	3	2	0.02476	87,704.71
18	2	3	3	0.02402	87,804.58
19	3	1	1	0.03449	120,090.07
20	3	1	2	0.03259	114,185.80
21	3	1	3	0.03147	114,704.92
22	3	2	1	0.03018	104,242.68
23	3	2	2	0.02844	96,877.70
24	3	2	3	0.02747	96,636.59
25	3	3	1	0.02790	103,574.94
26	3	3	2	0.02628	95,396.03
27	3	3	3	0.02541	94,769.64

모든 해를 나열하는 방법으로 최적해를 탐색하는 것은 완제품 품목의 수가 증가하면 계산량이 기하급수적으로 커지며 쉬운 일이 아니며, 따라서 본 논문에서 제시한 반복적 해법이 유용함을 알 수 있다.

탄소배출을 고려하지 않은 경우의 통합재고모형의 해는 제 2.1절의 발견적 해법으로 계산할 수 있으며, 이때의 통합총비용은 식 (13)을 이용하면 \$99,028.12이고, 연간 탄소배출량은 9,980.50(톤)이다.

탄소배출을 고려한 통합재고 모형의 유용성을 분석하기 위하여 위의 예제의 결과를 비교하면 통합총비용 절감액은 $JTC(t^0, \bar{k}^0) - JTC(t^*, \bar{k}^*) = \$99,028.12 - \$87,372.05 = \$11,656.07$ 이며, 11.77%의 통합총비용이 절감되었다. 그리고 연간 탄소배출량 감소량은 $22,035.49 - 20,866.46 = 1,169.03$ (톤)이며, 연간 5.31%의 탄소배출량이 감소하였음을 알 수 있다.

연간 탄소배출량을 최소화하는 공동발주주는 식 (11)을 이용하여 계산할 수 있으며, 이때의 연간 통합총비용은 \$111,621.75이며 연간 탄소배출량은 8,016.65(ton)이다. 공급사슬의 연간 탄소배출량을 최소화하는 재고정책은 연간 탄소배출량을 줄일 수 있지만 공급사슬의 통합총비용이 크게 증가함을 알 수 있다. 이를 요약하여 정리하면 다음의 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Comparison of Inventory Models

Models	JTC	Total Carbon Emissions
Classical Inventory Model	\$99,028.12	22,035.49(ton)
Cap & Trade Mechanism	\$87,372.05	20,866.46(ton)
Minimum Carbon Emission	\$111,621.75	20,071.65(ton)

앞의 수치 예의 입력자료 중에서 톤당 탄소가격은 배출권 거래시장에서 수요와 공급에 의하여 결정되며 변동성이 높은 입력자료이다. 국내의 탄소가격은 2015년 거래시장에서 개장 첫날 톤당 7,860원에서 2019년 1월말에 톤당 25,500원으로 224.4% 가파른 상승세를 보이고 있다. 톤당 탄소가격 C의 증가에 따른 탄소배출권 거래제 하에서 통합 총비용과 탄소배출을 고려하지 않고 재고정책을 수립할 때의 통합총비용을 계산하였으며 그 결과가 <Table 8>에 나와 있다.

<Table 8> Sensitivity of C and JTC

C	Cap & Trade Mechanism	Classical Inventory Model	Percentage Saving of JTC
\$10	\$96,503.76	\$99,223.17	2.74%
20	87,372.05	99,028.12	11.77
30	76,085.10	98,833.06	23.02
40	60,318.73	98,638.01	38.85
50	45,186.21	98,442.96	54.10

<Table 8>의 톤당 탄소가격의 변화에 따른 통합총비용의 변화를 보면 톤당 탄소가격, C가 증가함에 따라서 탄소배출권 거래를 고려한 통합재고 모형의 유용성이 증가함을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

2015년 프랑스 파리에서 열린 제21차 유엔기후변화협약(UNFCCC) 당사국총회(COP21)가 2주간에 걸친 협상 끝에 2020년 이후의 새 기후변화 체제 수립을 위한 최종 합의문인 「파리협정(Paris Agreement)」을 최종 채택했다.

파리 기후협정은 2020년 이후 선진국은 물론 개발도상국도 온실가스 감축에 참여하는 이른바 신기후 체제에 관한 내용을 담고 있다. 각국은 온실가스 감축 목표를 스스로 정해 국제사회에 약속하고 이 목표를 실천해야 하며, 국제사회는 그 이행에 대해서 공동으로 검증하게 된다.

이런 상황에서 기업들은 탄소배출을 줄이기 위한 다양한 노력이 필요하며, 친환경적 생산설비의 도입, 친환경적 제품의 개발뿐만 아니라 공급사슬 전 영역에서 물류의사결정에 탄소배출에 대한 고려를 하지 않을 수 없다. 물류의사결정에서 발주량의 조절은 탄소배출량을 줄일 수 있는 유용한 수단으로 알려져 있으며[6], 본 연구에서는 탄소배출권 거래제 하에서 기업의 운송활동 및 재고보유로 발생하는 탄소배출을 고려한 공급사슬에서의 다품목의 재고모형을 수립하였다.

국내의 탄소배출권 거래시장에서 탄소거래가격은 꾸준히 상승하고 있으며 앞으로 생산관리나 물류관리에서 환경에 대한 고려의 중요성은 더욱더 중요한 요소가 되며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

Acknowledgement

This research was financially supported by Hansung University.

References

- [1] Battini, D., Persona, A., Sgarbossa, F., A Sustainable EOQ Model : Theoretical Formulation and Applications, *International Journal of Production Economics*, 2014, Vol. 149, pp. 145-153.
- [2] Benjaafar, S., Li, Y., and Daskin, M., Carbon Footprint and the Management of Supply Chains : Insights from Simple Models, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 2010, Vol. 10, No. 1, pp. 99-116.
- [3] Bonney, M. and Jaber, M. Y., Environmentally Responsible Inventory Models : Non-classical Models for a Non-classical Era, *International Journal of Production Economics*, 2011, Vol. 133, No. 1, pp. 43-53.
- [4] Bouchery, Y., Ghaffari, A., Jemai, Z., and Dallery, Y., Including Sustainability Criteria into Inventory Models, *European Journal Operational Research*, 2012, Vol. 222, pp. 229-240.
- [5] Chen, X., Benjaafar, S., and Elomri, A., The Carbon-constrained EOQ, *Operations Research Letter*, 2013, Vol. 41, pp. 172-179.
- [6] Hovellaque, V. and Bironneau, L., The Carbon-constrained EOQ Model with Carbon Emission Dependent Demand, *International Journal of Production Economics*, 2015, Vol. 164, pp. 285-291.
- [7] Hua, G., Cheng, T.C.E., and Wang, S., Managing Carbon Footprints in Inventory Management, *International Journal of Production Economics*, 2011, Vol. 132, No. 2, pp. 178-185.
- [8] Jyun, Y. S., *Environmental Management*, Bnmbook, 2014, pp. 13-14, 389-393.
- [9] Kim, D.H., An Integrated Inventory Model for a Vendor-Buyer Supply Chain with Transportation Cost, *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, 2012, Vol. 17, No. 4, pp. 99-111.
- [10] Kim, D.H., Generalized Single Manufacturer and Multiple Retailers Supply Chain Model in JIT Purchasing, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2011, Vol. 34, No. 4, pp. 25-34.
- [11] Kim, D.H., An Integrated Inventory Model for a Three-Layer Supply Chain with Multiple Items, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2014, Vol. 37, No. 4, pp. 116-125.
- [12] Kim, D.H., Considering Carbon Footprints for a Vendor-Buyer Supply Chain under Cap-and-Trade Mechanism, *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, 2015, Vol. 20, No. 4, pp. 91-99.
- [13] Kim, D.H., Multi-Product Inventory Model with Carbon Footprints under Cap-and-Trade Mechanism, *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, 2016, Vol. 21, No. 4, pp. 85-95.
- [14] Marintek, Trondheim, Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships, *International Maritime Organization*, 2000, No. 2-31.

ORCID

Dae-Hong Kim | <http://orcid.org/0000-0002-5151-2941>