

# 탄소세 부과시 건설 물류비용 최소화를 위한 운송빈도 최적화

## Optimum Delivery Frequency for Reducing Construction Logistics Cost under a Carbon Taxation

박문서\*  
Park, Moonseo

전명희\*\*  
Chun, Myunghee

이현수\*\*\*  
Lee, Hyun-Soo

황성주\*\*\*\*  
Hwang, Sungjoo

장명훈\*\*\*\*\*  
Jang, Myung-Houn

### 요약

지구온난화로 인해 촉발된 기후변화로 그린(green)이라는 코드가 21세기 중요한 생존전략이 되어가고 있다. 특히 환경부에서 2012년부터 도입할 예정인 탄소세 부과정책은 소요자재의 종류가 복잡·다양하고 건설현장의 지역적 분산으로 인하여 자재 운송 중 탄소배출이 많은 건설 산업에 상당한 부담으로 작용할 전망이다. 그러나 현재 건설현장에서 사용되고 있는 JIT delivery 방식은 다빈도 소량 발주 방식으로 운송 중 배출되는 탄소량이 많아 향후 탄소세 부과시 물류비용에 부정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이에 본 연구는 탄소세 부과시 총물류비용을 최소화하기 위한 운송빈도 최적화 전략을 제시하고자 한다. 연구방법은 먼저, 시스템다이내믹스 모델링 기법을 이용해 건설현장의 재고관리 모델을 구축한 후 이를 시뮬레이션 한다. 그리고 그 결과에 따라 최적화된 운송빈도를 산출할 수 있는 수학적 모형을 개발한다. 시뮬레이션 결과, 다빈도 소량 발주 방식이 항상 유효한 수단은 아니며 물류비용을 최소화하면서도 공정에 피해를 주지 않도록 최적화된 운송빈도에 따라 재고를 관리해야 하는 것으로 분석된다. 본 연구는 JIT 배송체계를 환경적인 측면에서 재해석함으로써, 건설 자재운송시스템의 변화 필요성을 제시하고 건설기업의 물류활동을 효율적으로 관리할 수 있는 개념적 틀을 제공했다는 데 그 의의가 있다.

**키워드** : Just-In-Time, 운송빈도, 물류비용, 탄소세, 시스템다이내믹스

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

세계는 지금 무분별한 에너지 소비에 따른 지구온난화로 심각한 환경위기에 직면해 있다. 지금과 같이 에너지 다소비 체제가 지속될 경우 지구촌이 치러야 할 지구온난화에 따른 경제적 손실이 매년 GDP의 5~20%에 달할 것이라 전망이 나올 정도이다 (Stern 2006). 이미 유럽 등 선진국들은 자동차의 이산화탄소 배출량 기준을 강화하는 등 자원의 효율적 관리를 통한 저탄소 녹색성장에 돌입했으며, 우리나라도 저탄소 녹색성장기본법을

제정하는 등 세계적 흐름에 동참하여 기후변화에 적극 대응하려는 움직임을 보이고 있다. 특히 환경부에서 2012년부터 도입할 예정인 탄소세 부과 정책은 제조업뿐만 아니라 소요자재의 종류가 복잡·다양하고 건설현장의 지역적 분산으로 인하여 자재 운송 중 탄소배출이 많은 건설 산업에도 상당한 부담으로 작용할 전망이다. 실제로 International Energy Agency(2009)의 보고서에 따르면 2007년 전 세계 탄소배출의 절반에 가까운 양이 제조 및 건설업과 운송부문에서 발생한 것으로 조사되었다.

그 동안 국내 기업들은 재고감축을 통한 물류비용절감에 초점을 맞추어왔다. 그러나 최근 환경 및 에너지와 관련하여 세계 각

\* 중신회원, 서울대학교 건축학과 부교수, 공학박사(교신저자), mspark@snu.ac.kr

\*\* 일반회원, 서울대학교 건축학과 대학원 석사과정, happyat@snu.ac.kr

\*\*\* 중신회원, 서울대학교 건축학과 교수, 공학박사, hyunslee@snu.ac.kr

\*\*\*\* 일반회원, 서울대학교 건축학과 대학원 박사과정, nkkt14@snu.ac.kr

\*\*\*\*\* 중신회원, 제주대학교 건축학과 조교수, 공학박사, jangmh@jejunu.ac.kr

국의 규제가 강화되면서 글로벌 기업들은 단순한 재고감축이 아닌 지속성장의 관점에서 탄소비용을 물류비용에 반영하기 시작했다. 따라서 높은 물류비, 원자재 수급불안 등 원가상승 압박에 늘 시달리는 한국 건설기업의 경우 재고비용뿐만 아니라 운송비용과 이에 상응하는 탄소비용을 모두 고려함으로써 글로벌경쟁력을 제고할 필요가 있다.

현재 건설현장에서는 건설공사의 대형화, 복잡화, 다기능화 추세에 따라 현장 내 자재재고가 증가하면서 재고를 최소화하기 위해 JIT(Just-In-Time) 구매를 통해 재고를 관리하고 있다. JIT 구매의 가장 큰 특징은 다빈도 소량 구매로, 구매업체가 자재를 주문하면 공급업체는 구매업체에 자재를 다빈도 소량(frequent small lot)으로 나누어 납품하게 된다(김대홍 2003). 그러나 본래 JIT 철학과 그린(green) 철학은 서로 상충 관계에 있기 때문에 향후 탄소세 시행시 건설업계에 큰 타격이 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 건설프로젝트에 있어 탄소세를 포함한 총물류비용을 최소화하기 위한 운송빈도 최적화 전략을 제시 한다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서 탄소배출은 실제로 제조단계와 운송단계 그리고 재고창고에서 모두 발생하지만 제조단계와 재고창고에서 배출되는 탄소는 일정하다고 가정하여, 운송 중 연료소비로 인해 배출되는 탄소만을 연구 범위로 한정한다. 화물자동차 운송산업의 효율성을 분석한 김웅이(2009)의 연구에 따르면, 2006년 국내 화물운송 분담비중에서 공로운송이 76.6%로 가장 높은 비중을 차지하고 있고 건설산업의 특성상 자재의 운송이 대부분 공로운송을 통해 이루어지므로 공로운송을 연구 대상으로 한정한다. 또한 화물차량의 운송효율성을 평가하기 위한 지표인 공차율은 운송단계에서 항상 발생한다는 가정 하에 연구를 진행한다.

연구의 방법 및 절차는 다음과 같다.

- 1) 탄소세가 시행된다는 가정 하에 선행 연구 분석을 통하여 건설현장의 재고관리 시스템의 문제점을 도출한다.
- 2) 일반적인 건설현장의 재고관리 시스템을 시스템다이내믹스(System Dynamics) 시뮬레이션 기법으로 모델링한다.
- 3) 평가 시나리오를 설정하여 탄소세가 건설현장재고관리 시스템에 가져올 파급효과를 분석한다.
- 4) 시뮬레이션 결과에 따라 탄소세 부과시 총물류비용을 최소화하기 위한 운송빈도 최적화 모형을 개발한다.

## 2. 선행 연구 분석

### 2.1 JIT delivery 시스템

JIT 생산방식은 일본의 자동차 산업을 중심으로 발전하여 전 세계 기업들로부터 전통적 생산방식의 비효율과 낭비를 제거할 수 있다는 인식 하에 널리 도입되어 왔다(이상수 1992). JIT의 궁극적인 목표는 낭비요소와 과잉재고를 제거함으로써 저비용으로 고품질의 제품을 적시에 생산하는 것이다(Svensson 2001). 그리고 이러한 목표를 가진 대부분의 회사들이 JIT를 성공적으로 수행하기 위해 가장 중요하게 생각하는 부분이 바로 JIT 구매 부분이다(Billesbach et al, 1991).

앞에서도 언급했듯이 JIT 구매는 자재를 다빈도 소량으로 구매하는 것을 큰 특징으로 하는 발주방식으로서 현재 건설현장에서는 재고유지비용과 자재적치공간을 줄이기 위해 JIT delivery 시스템을 도입해 자재를 관리하고 있다. 건설현장에서 공급업체에 자재를 발주하면 공급업체는 주문받은 자재를 다빈도 소량으로 나누어 건설현장에 납품하게 되는 것이다.

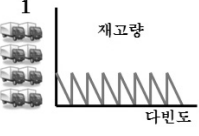
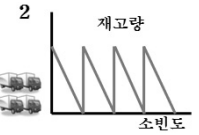
그러나 재고관리 효율성과 운송비용은 서로 상충되는 관계에 놓여 있다. 표 1을 보면, JIT delivery 방식의 시나리오 1은 non-JIT delivery 방식의 시나리오 2에 비해 운송빈도는 높지만 재고를 더 낮은 수준으로 유지하고 있다. 따라서 운송비용은 증가하지만 재고유지비용은 감소하게 된다. 시나리오 2는 그 반대의 경향을 보여주고 있다. 이 그림에서 특히 주시해야 할 부분은 운송 중 탄소배출 부분이다. 시나리오 1과 같이 JIT delivery 방식을 도입하면 운송비용이 늘어나 기업의 부담이 가중되는 것 외에도, 탄소배출에 의한 환경문제가 심각하게 나타날 가능성이 있기 때문이다(오세조 2001). 향후 운송 중 탄소배출을 고려하게 될 경우 JIT delivery 방식과 non-JIT delivery 방식을 어떻게 적절히 조화시킬 것인가 하는 문제가 JIT 구매 전략의 핵심이 될 것이다.

이러한 JIT delivery 방식의 경제적 효과에 대한 선행연구를 살펴보면, Pan & Liao(1989)의 단일 공급환경에서 다빈도 운송방식의 효과를 입증하기 위한 경제적 주문량(economic order quantity, 이하 "EOQ") 모형 개발 연구가 있었으며, Ramasesh(1990)가 이 EOQ 모형을 확장하여 JIT 구매를 이행하기 위한 모형으로 새롭게 개발한 연구가 있었다. Farzaneh(1997)는 총비용 측면에서 JIT 구매와 EOQ 모형의 구매 비용을 비교 분석하였다. 앞의 연구들이 완제품 재고만을 고려한 통합재고모형을 수립하기 위한 연구였다면 최근 김대홍(2003)의 연구는 JIT

구매 하에서 공급업자의 완제품을 생산하기 위한 다원자재까지를 고려한 공급업자와 구매업자의 통합재고모형을 제시하였다.

위의 연구들은 모두 재고유지비용이나 운송비용과 같은 순수 물류비용만을 고려한 연구로 탄소비용은 고려하지 않는다. 그리고 총비용을 최소화하기 위해 선행 연구에서 제시한 전략들이 상호간에 어떠한 작용을 통해 문제를 해결하는지에 대해서는 알 수 없다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 시스템다이나믹스를 이용하여 탄소세를 고려한 건설현장 재고관리 모델을 구축한다.

표 1. JIT delivery vs. non-JIT delivery

시나리오	선택크기	재고		운송	
		비용	수준	비용	탄소배출
<b>1</b>  재고량 다빈도	↓	↓	↓	↑	↑
<b>2</b>  재고량 소빈도	↑	↑	↑	↓	↓

## 2.2 시스템다이나믹스

1950년대 후반에 개발된 시스템다이나믹스는 여러 산업, 경제, 사회, 환경 시스템을 분석하는데 사용되어 왔다(Turek 1995). 시스템다이나믹스의 가장 강력한 특징 중 하나는 복잡한 비선형 시스템에 분석적인 해결책을 제공하는 것으로(Kwak 1995), 건설프로젝트와 같은 복잡성에서 기인한 문제들을 다루기에 아주 적합한 방식이다(Peña-Mora & Park 2001).

시스템다이나믹스 모델링은 시스템에 대한 모델 설계자의 이해를 바탕으로 개념적 모델 구조를 인과관계루프 다이어그램 형태로 기술한다(Kwak 1995). 인과관계루프 다이어그램의 변수들은 변수간의 인과관계를 표시하는 화살표로 연결된다(Sterman 2000). 인과관계는 모두 하나의 극성을 갖고 양(+)의 인과관계 혹은 음(-)의 인과관계를 표현한다.

그림 1은 재고와 자재 주문량과의 인과관계를 도식화한 예이다. 재고창고에 자재가 많이 쌓여 있으면 자재담당자는 자재의 사용률을 높게 되고 자재 사용률이 높아질수록 자재주문량 또한 증가하게 된다. 이렇게 자재주문량이 많아지면 그만큼 운송량이 많아져 운송률이 높아지므로 이는 다시 재고를 증가시키는 결과를 초래하게 된다. 그러나 재고량이 기준치를 초과할 경우 자재담당자는 자재주문량을 줄이려 할 것이고 이는 결국 재고량을 줄이는 효과를 가져 오게 된다. 이처럼 효율적인 자재관리를

위해서는 자재와 관련된 피드백 프로세스에 대한 이해가 선행되어야 하며 시스템다이나믹스를 통해 이러한 피드백 구조를 파악할 수 있다.

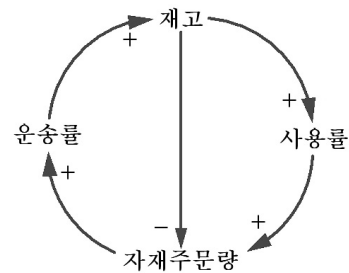


그림 1. 인과지도 다이어그램

## 3. 시스템다이나믹스 모델 개발

본 장에서는 시스템다이나믹스를 이용하여 환경 규제를 고려한 건설현장의 재고관리 프로세스 모델을 구축한다. 본 모델은 A. T. Kearney Inventory Distribution Simulator (Version 1.0b)<sup>1)</sup>의 재고분배 모델을 기반으로 구축되었으며, 이를 건설현장 재고관리 모델로 확장·변형하였다.

### 3.1 건설현장 재고관리 모델

일반적으로 건설자재는 원자재 원료 취득, 제조 및 가공, 수송 및 유통의 단계를 거쳐 건설현장에 반입되는데 반입된 자재들은 공사에 사용되기 전까지 재고의 형태로 유지된다. 이 재고는 본 모델에서 “건설현장 재고”라는 저장변수로 설정되었으며 수요(사용률)와 공급(운송률)이라는 두 개의 변수에 의해 증가하고 감소한다. 저장변수의 수식은 다음과 같다.

건설현장 재고

$$= \text{운송률} - \text{사용률}$$

Units: Product

그림 2를 보면, 건설현장에서 자재에 대한 수요가 발생하면 이는 바로 재고의 사용으로 이어진다. 그리고 자재 담당자는 이때의 사용률을 보고 앞으로의 사용량을 예측하게 되는데 자재가 사용되는 평균 시간이 짧아질수록 자재 사용에 대한 예측량이

1) A. T. Kearney社에서 개발한 Inventory Distribution Simulator는 공급망 상에서 재고와 시간지연이 어떻게 과잉주문과 파동을 만들어내는지를 보여준다.

증가하게 되어 자재 주문량을 늘리게 된다(사용률 → 사용량 예측 → 자재주문). 자재 사용에 대한 예측량의 증가는 다시 희망재고량을 높이게 되어 자재주문량을 증가시키게 된다(사용률 → 사용량 예측 → 희망재고 → 자재주문). 자재주문에 대한 수식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

**자재주문**

$$= \text{사용량 예측} + (\text{희망재고} - \text{건설현장 재고})$$

/재고 조정 시간

Unit: Product/Week

운송률은 자재주문량과 운송빈도 변수에 의해 결정된다. 예를 들어, 운송빈도가 다빈도일 때와 소빈도일 때에 따라 1회 운송시 운송량이 달라지게 된다. 운송률은 모델에서 다음과 같은 수식으로 정의된다.

**운송률**

$$= \text{자재 주문} / \text{운송빈도}$$

Unit: Product/Week

이처럼 건설현장의 재고는 그림 2와 같은 흐름도(stock and flow diagram)에 따라 관리되고 있으며 JIT delivery 시스템을 통해 운송빈도를 늘림으로써 소량의 자재를 건설현장으로 반입시키고 있다.

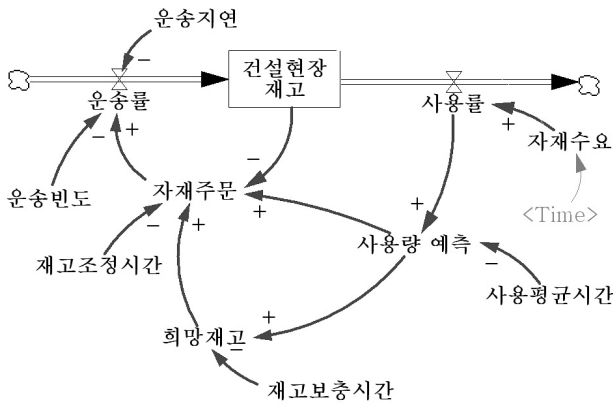


그림 2. 건설현장 재고관리 모델

**3.2 탄소세 부과 모델**

향후 탄소세가 시행된다는 가정 하에 탄소세가 현재의 JIT delivery 방식에 미치는 영향력을 파악하고자 탄소세 부과 모델을 구축하였다.

본 연구에서 탄소 배출은 운송 중에만 발생한다고 가정하였으므로 기업 입장에서 탄소세가 증가하게 되면 운송 중 배출되는 탄소량을 줄이기 위한 정책을 시행하려 할 것이다. 따라서 그림 3과 같이 운송빈도의 증가는 연료소비를 가중시켜 탄소배출량을 증가시키게 되고 탄소배출량의 증가는 환경규제정책에 따라 탄소세의 증가로 이어지게 된다. 이는 결국 탄소세를 낮추기 위한 방안으로 운송빈도를 낮추는 효과를 불러온다(운송빈도 → 연료소비 → 탄소배출 → 탄소세 → 운송빈도).

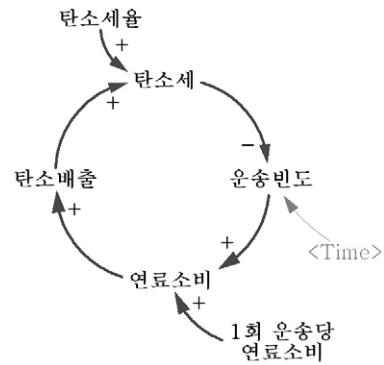


그림 3. 탄소세 부과 모델

**4. 시나리오별 시뮬레이션 결과 및 분석**

**4.1 평가 시나리오 및 모델 설정**

본 연구는 다빈도 소량 방식의 JIT delivery 방식이 많은 이점을 가지고 있기는 하지만 향후 탄소세가 시행되었을 때 운송비용의 증가 및 탄소세로 인해 총물류비용에 부정적인 영향을 미칠 것이라는 전제 하에 총물류비용을 최소화하는 운송빈도 최적화 전략을 제시하고자 한다. 이러한 연구목적을 달성하기 위하여 3장에서 건설현장의 재고관리 프로세스를 벤심(Vensim)<sup>2)</sup> 소프트웨어를 활용해 모델링하고 이렇게 구축한 모델을 시뮬레이션 하기 위해 탄소세 시행 여부 및 운송빈도에 대하여 크게 3가지의 형태의 시나리오를 표 2와 같이 설정한다.

BAU(Business As Usual) 시나리오는 지금과 같이 탄소세가 시행되지 않았을 때 다빈도 소량 방식과 소빈도 다량 방식의 자재 구매방식이 건설현장의 재고관리에 미치는 영향을 파악하기 위한 시나리오이다. LCT(Low Carbon Tax)와 HCT(High Carbon Tax) 시나리오는 모두 탄소세가 시행되었을 때의 시나리오로, 탄소세 시행이 건설현장의 재고관리 시스템에 미치는

2) 벤심(Vensim) 소프트웨어는 미국의 Ventana System 社에서 개발한 소프트웨어로, 동적인 시스템의 모델을 시뮬레이션하고 분석하는데 도움을 주는 비주얼 모델링 도구(Visual Modeling Tool)이다.



영향력과 탄소세 부과정도가 재고관리 시스템에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

따라서 HCT 시나리오에서는 LCT 시나리오보다 탄소세를 2배 더 부과하는 것으로 설정하여 다빈도일 때와 소빈도일 때를 비교하도록 한다. 그리고 자재수요는 초기 1000개에서 5주 후 40% 증가하도록 설정하고 자재가 평균적으로 사용되는 시간과 재고를 조정하는 시간을 4주로 설정한다. 마지막으로 재고는 2주 간격으로 보충되는 것으로 가정하며 3주의 운송지연이 발생하는 것으로 기본 모델을 설정한다. 시나리오 분석을 위한 구체적인 모델 설정은 표 3과 같다.

표 2. 평가 시나리오

(단위 : 회)

시나리오	탄소세 시행여부(부과수준)	운송빈도	
BAU	미시행	Low	9
		Base	10
		High	11
LCT	시행 (Low)	Low	9
		Base	10
		High	11
HCT	시행 (High)	Low	9
		Base	10
		High	11

표 3. 건설현장 재고관리 모델 설정

변수	값	단위	참조
자재수요	1000 (초기)	product/Week	5주 후 자재수요가 40% 증가하도록 설정
사용평균시간	4	Week	
재고보충시간	4	Week	
재고조정시간	2	Week	
운송지연	3	Week	

## 4.2 시나리오 분석

그림 4, 5, 6은 120주에 걸쳐 시물레이션 한 BAU 시나리오의 결과 그래프로, 그림 4와 5는 자재를 한 주에 10회에 걸쳐 운송했을 때의 재고변화를 보여주고 있다. 매주 자재가 1000개씩 사용되다가 5주 후 사용량이 40% 증가되었고 자재 사용량이 증가한 시점부터 재고가 떨어지기 시작했다. 이로 인해 희망재고와 사용 예측량이 증가해 자재주문량이 많아지게 되면서 운송물량이 증가하였다. 그리고 증가한 운송물량이 사용률을 초과하게 되는 약 9주부터 재고가 보충되기 시작했고 57주에 희망재고 수준에 도달하면서 안정화되었다. 즉, 건설현장의 재고관리는 자재수요에 따라 재고가 떨어지면 희망재고와 사용 예측량만큼의 재고를 확보하기 위해 자재를 주문하게 되고 운송되는 자재가 희망재고 수준을 넘지 않도록 운송빈도를 통해 운송량을 조절하여 재고를

관리하고 있다.

그림 6은 운송빈도 변수를 9/10/11회로 변화시켜 시물레이션했을 때의 건설현장의 재고 모습이다. 운송빈도가 9회일 때 재고량이 가장 많았으며 희망재고(2800개)를 약 500개 초과하였다. 반대로 운송빈도가 가장 높을 때 재고량은 가장 낮았지만 희망재고 수준에는 미치지 못하였다. 또한 재고가 안정화되는데 걸리는 시간에서도 차이가 발생하였다. 빈도가 낮을수록 재고 안정화 시간이 짧은 것으로 나타났다.

즉, 재고는 타 상수의 설정에 따라 변화하게 되는데 과도한 재고는 재고유지비용을 증가시키고 빈번한 운송은 운송비용을 증가시킨다. 그러므로 적절한 운송빈도를 찾지 못한 상황에서 운송비용의 증가로 인한 손실이 재고유지비용을 감소시킴으로써 얻은 이익과 건설현장의 자재 적치 공간의 효율성으로 얻은 이익 보다 낮다면 현 상황에서는 JIT delivery 방식이 더 선호되는 것으로 분석된다.

LCT 시나리오는 탄소세가 시행되었을 때의 시나리오로 탄소세율을 제외한 나머지 변수들의 가정은 BAU 시나리오와 같다. 표 4를 보면, BAU 시나리오와 달리 평균 재고량이 굉장히 급증한 것을 알 수 있다. 이는 탄소세 부과 모델에서 언급했듯이 운송시 배출되는 탄소량이 탄소세에 영향을 미쳐 기업에서 이 탄소비용을 낮추기 위해 운송빈도를 줄이려 하기 때문에 나타난 결과이다. 그러나 탄소비용을 낮추기 위해 희망재고에 비해 과도한 재고를 보유하게 되면 오히려 재고유지비용이 늘어나게 된다. 탄소세가 2배 높게 부과되는 HCT 시나리오의 경우 LCT 시나리오 보다 더 많은 재고량을 보유하고 있다.

결국 탄소세가 시행되면 기업 입장에서는 탄소세를 낮추기 위해 탄소가 가장 많이 배출되는 운송부분에서 비용을 줄이려고 할 것이고 탄소세율이 높아지면 높아질수록 이러한 현상은 더욱 심화될 것이다. 하지만 탄소세를 낮추기 위해 건설기업이 JIT delivery 방식에서 non-JIT delivery 방식으로 전환한다고 해서 그것이 기업에 이익을 가져다주지는 못 한다. 왜냐하면 필요 이상으로 과도한 재고 규모는 재고유지비용을 증가시키고 자재 적치에 따른 공간 확보로 인해 현장 내 이동에 불편을 겪을 수도 있으며 생산성을 저하시킬 수 있기 때문이다. 즉, JIT delivery 방식과 non-JIT delivery 방식은 서로의 장점이 다시 서로의 단점이 될 수 있기 때문에 탄소세 시행시 이를 적절히 조화시켜 재고를 관리해야 한다. 따라서 운송비용과 탄소비용을 크게 증가시키지 않으면서도 적절한 재고 수준을 유지하기 위한 운송빈도를 찾는다면 건설 공정 및 공기에 차질을 빚지 않으면서 물류비용을 저감시킬 수 있을 것이다. 본 연구에서는 이를 위한 운송빈도 최적화 모형을 5장에서 제안하고자 한다.

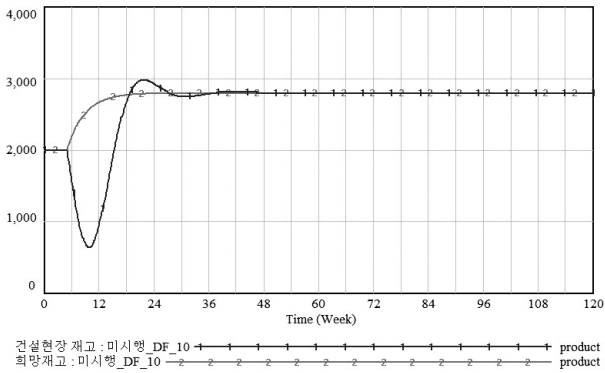


그림 4. BAU 시나리오의 재고 변화

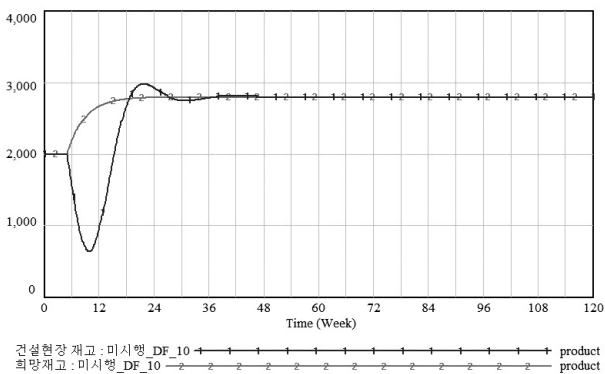


그림 5. BAU 시나리오의 재재 변화

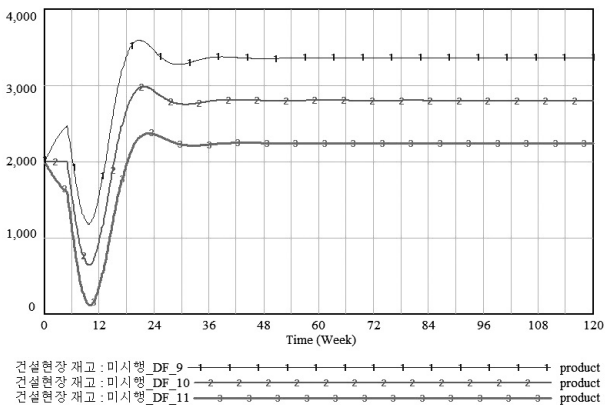


그림 6. BAU 시나리오의 운송빈도에 따른 재고 변화

표 4. 시나리오별 건설현장 재고 비교

(단위 : Product)

시나리오	운송빈도		
	9	10	11
BAU	3,359	2,799	2,239
LCT	5,320	4,878	4,526
HCT	6,546	6,184	5,974

## 5. 운송빈도 최적화 모형 개발

### 5.1 총물류비용의 상충관계

물류비용에서 가장 중요하게 고려되는 부분은 운송비용과 재고유지비용으로 각각 총비용의 약 1/3과 1/5을 차지하고 있다 (Frank & Joseph 1989). 그러나 기업은 물류비용의 절감을 위해 기업 통제가 어려운 운송비용보다는 비교적 기업의 통제가 쉬운 재고비용의 감소에 중점을 두고 있다(서선덕 2001). 현재 재고비용을 감소시키려는 노력은 다빈도 소량구매를 통해 이루어지고 있는데 운송빈도는 재고 수준을 낮추기 위한 가장 강력한 린(Lean) 도구 중 하나이지만(토마스 골즈비 외 2006) 재고비용의 감소와 함께 운송비용을 증가시키는 원인이 되기도 한다(정정우 2007).

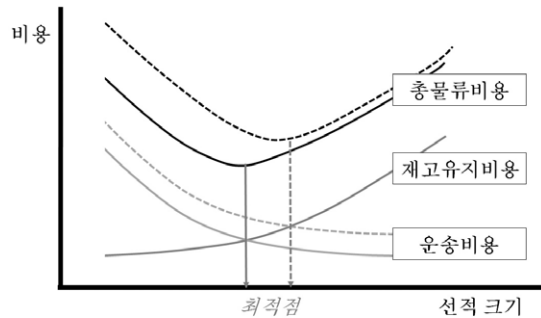


그림 7. 물류비용 최소화화를 위한 물류비용 곡선

그림 7의 물류비용 곡선 그래프를 보면, 재고유지비용과 운송비용은 서로 상반관계에 놓여 있으며 이 둘이 만나는 지점이 총물류비용을 최소화 시키는 최적점이 된다. 그러나 향후 탄소세 부과정책에 따라 운송비용에 탄소비용이 반영되면 그만큼 운송비용이 증가하게 되어 결국 총물류비용의 최적점을 변화시킨다. 즉, 재고 수준을 낮추기 위한 차량의 다빈도 운행이 운송비용뿐만 아니라 연료 소비에 따른 탄소배출을 증가시켜 이를 조절하기 위한 방안인 탄소세까지 높이는 역효과를 가져오게 되는 것이다.

향후 탄소세가 시행되었을 때 재고유지비용의 감소로 얻는 이득이 증가한 운송비용보다 크지 않을 경우 해당 기업은 운송비용뿐만 아니라 이에 상응하는 탄소비용까지를 부담해야 할 것이다. 따라서 본 장에서는 이러한 총물류비용(재고유지비용, 운송비용, 탄소세)을 최소화하기 위한 최적화된 운송빈도를 산출하고자 한다.

## 5.2 운송빈도 최적화 모형

JIT 구매 하에서 건설현장의 자재담당자는 공급업자에게 단일품목을 1회 주문량만큼 발주하며, 주문을 받은 공급업자는 이를 회에 나누어 다빈도 소량(=/)으로 건설현장으로 운송하게 된다. 이 때 운송시마다 고정운송비(=)가 소요되며 자재 보관시 재고유지비용이 발생하게 된다. 본 연구에서는 재고유지비용과 운송비용에 탄소세까지를 포함한 비용을 총물류비용으로 정의하였으며 연구를 진행하기 위해 필요한 기본가정은 EOQ 모형을 기반으로 하였다. 기본가정 및 수학 모형의 기호정의는 다음과 같다.

〈기본가정〉

- 가. 단일 품목만을 고려한다.
- 나. 수요(단위기간당 사용률)가 확정적인 경우를 다루며 따라서 안전재고는 두지 않는다.
- 다. 단위당 재고유지비용과 1회 운송당 운송비용은 고정되어 있다.
- 라. 재고부족(stock-out)과 미도착주문(back-order)은 발생하지 않는다.

〈기호정의〉

- $H_b$ : 단위당 재고유지비용
- $Q$ : 1회 주문량
- $N$ : 1회 주문당 운송빈도
- $Z$ : 1회 운송당 운송비용
- $D$ : 건설자재 수요
- $C$ : 탄소세율

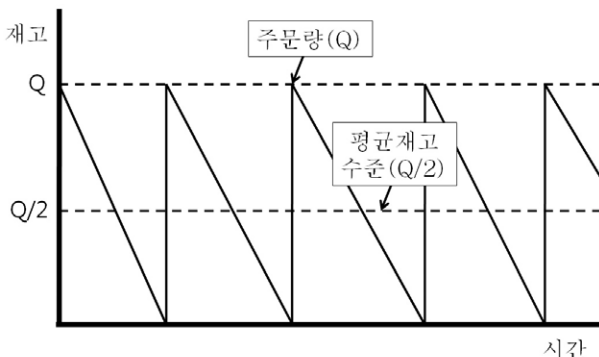


그림 8. 구매업자와 공급업자의 재고수준 변화

### 5.2.1 재고유지비용의 산정

건설업에서 재고는 경제적, 사회적 가치의 감소와 이를 위한

각종 비용지출이 수반되기 때문에 가능한 한 낮은 수준으로 재고를 유지하도록 해야 한다(김상훈 외 2004). 이를 위해 일반적으로 JIT 구매에서는 구매업자가 개의 자재를 공급업자에게 발주하면 공급업자는 주문받은 물량을 번에 나누어 다빈도 소량으로 납품하게 된다. 그림 8은 다빈도 소량 방식에 따라 구매업자와 공급업자의 재고수준이 어떻게 변화되는지를 보여주고 있다. 먼저 주문량 가 건설현장에 공급되면 일정한 수요율에 의해 재고수준이 사선을 따라 감소하게 된다. 그리고 재고가 평균재고수준에 다다르면 자재를 재주문 하게 된다.

재고유지비용은 평균재고량과 단위당 재고유지비용의 곱으로 나타낼 수 있는데 이때의 평균재고량은 최대재고(=)와 최소재고의 평균인 가 된다. 즉, 회에 걸쳐 현장으로 공급된 주문자재가 바로 재고량이 되며 이때의 평균재고량은 /2이 된다. 이 평균재고량에 단위당 재고 유지비용을 곱하면 재고유지비용(Holding Cost: HC)을 산출할 수 있다. 산식은 다음과 같다.

$$HC_{buyer} = H_b \frac{Q}{2N} \quad \dots (1)$$

### 5.2.2 운송비용의 산정

운송은 물류에 있어 단일 비용 중 가장 큰 비중을 차지하며 이러한 운송비 중 트럭운송비용이 83%에 해당한다(토마스 골즈비 외 2006). 이러한 트럭의 1회 주문당 운송횟수에 1회 운송당 운송비용을 곱해 운송비용(Transportation Cost: TC)을 계산해 낼 수 있다. 여기서 1회 운송당 운송비용이란 단위 주행 거리당 소비하는 연료의 양을 비용으로 환산한 값을 말한다. 1회 주문당 운송빈도는 /이며 이때의 운송비용은 /이다.

$$TC_{buyer} = Z \frac{ND}{Q} \quad \dots (2)$$

### 5.2.3 탄소세의 산정

탄소세(Carbon Tax: CT)란 화석 연료를 연소시키면서 배출되는 탄소에 대한 세금을 의미한다(Rudiger & James 1991). 건물 건설시 탄소는 에너지 사용이나 장비사용이 많은 시공단계와 운송단계에서 많이 배출되는데 본 연구에서는 운송 중 연료가 소비되는 과정에서 배출되는 탄소만을 고려한다. 탄소세는 탄소세율에 연료소비량을 곱한 값으로, 연료소비량은 1회 운송당 운송비용에 운송빈도를 곱하여 계산된 운송비용과 같다고 가정한다. 따라서 위의 식(2)에 탄소세율을 곱하면 탄소세를 구할 수 있다.

$$CT_{buyer} = CZ \frac{ND}{Q} \quad \dots (3)$$

### 5.2.4 최적 빈도 선정

총물류비용을 최소화 하는 최적의 운송빈도점을 찾기 위하여 재고유지비용과 운송비용 그리고 탄소세를 공통변수(운송빈도)에 비례하는 부분과 반비례하는 부분으로 나누어 각각 식(1), (2), (3)과 같이 정의한다. 총물류비용(Total Logistics Costs : TLC)은 이들의 합으로 나타내므로 다시 다음과 같은 수식으로 정리할 수 있다.

$$TLC_{buyer} = H_b \frac{Q}{2N} + Z \frac{ND}{Q} + CZ \frac{ND}{Q} \quad \dots (4)$$

위의 식에서 총물류비용을 최소화하는 운송빈도를 구하기 위해 식(4)를 Q에 대해 편미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial TLC_{buyer}}{\partial N} = \frac{H_b}{2N^2} - \frac{ZD}{Q} - \frac{CZD}{Q} \quad \dots (5)$$

그러므로, 최적 운송빈도는 식(6)과 같다.

$$N^* = Q \sqrt{\frac{H_b}{2ZD(1+C)}} \quad \dots (6)$$

### 5.3 예제를 통한 최적 빈도 타당성 검토

앞에서 도출된 최적 빈도 모형의 유용성을 검토하기 위해 표 5에 제시되어 있는 수치를 이용해 총물류비용을 최소화하는 최적 빈도값을 유도한다. 단, 단위당 재고유지비용과 1회 운송당 운송비용은 같다고 가정한다.

식(6)에 따라 먼저 탄소세율이 0일 때의 최적화된 운송빈도(optimum1)를 도출하고 탄소세율이 30원일 때의 운송빈도(optimum2)를 도출하였다. 그리고 도출된 운송빈도값을 다음 표 6과 같이 세분화한 뒤 각각을 식(4)에 적용하여 산출된 총물류비용을 비교하였다.

탄소세가 시행되면 물류비용에 전에 없던 탄소비용이 반영되기 때문에 비용 면에서 탄소세 부과시의 총물류비용이 더 높게 나타났으며 탄소세가 시행되기 전에는 운송빈도가 7번이었으나 탄소세 시행후에는 2번으로 확연히 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 그리고 탄소세 미시행시와 시행시 각각에 대해 도출한 최적화된 운송빈도가 총물류비용 최소화 측면에서 가장 좋은 성과를 보였다. 이는 그림 6과 같이, 탄소세 시행시 운송빈도가 낮으면 운송량이 많아져 재고유지비용이 증가하게 되고 운송빈도가 낮으면 재고량은 적지만 운송빈도 만큼 운송비용이 증가하는 결과와 부합하고 있다.

표 5. 예제 가정

$H_b$	$Q$	$Z$	$D$	$C$ (시행시)
1,000(원)	200(개)	1,000(원)	500(개)	30(원)

표 6. 탄소세 시행 여부에 따른 총물류비용 비교

탄소세 시행여부	운송빈도(회)	총물류비용(원)
미시행	6,2	31,629
	optimum1 = 6,3	31,623
	6,4	31,625
시행	1	177,500
	optimum2 = 1,1	176,159
	1,2	176,333

## 6. 결론

본 연구는 향후 탄소세 부과 시 총물류비용을 최소화하기 위한 최적화된 운송빈도를 제시하고자 시스템다이내믹스를 이용하여 건설현장의 자재관리 프로세스를 모델링하고 최적의 운송빈도를 산출하기 위한 산식을 도출하였다. 시뮬레이션 결과는 두 가지 중요한 시사점을 제공해 준다. 첫째, 탄소세 부과시 JIT delivery 방식의 운송전략은 재고유지비용은 감소시키지만 오히려 총물류비용을 증가시킨다. 둘째, 과도한 탄소세 부과는 물류비용에 압박감을 초래하여 자재의 적시도달이 중요한 건설현장에 악영향을 끼칠 수 있으며 건설공기에 큰 차질을 불러올 수 있다. 즉, 탄소세 부과여부에 따라 적절한 자재 발주전략을 수립함으로써 재고관리 시스템을 개선시켜야 한다.

이러한 결과는 건설공사가 대형화, 복잡화됨에 따라 사용자재의 종류가 다양해지고 있는 건설기업에 물류활동을 효율적으로 관리할 수 있는 개념적 틀을 제공함으로써, 건설 기업의 경쟁력 강화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 JIT 배송체계를 환경적인 측면에서 재해석함으로써, 건설 자재운송시스템의 변화 필요성을 제시하였는데 본 연구의 의의가 있다.

본 연구는 논의를 단순화시키고 탄소세 적용효과를 강조하기 위해 총물류비용을 재고유지비용과 운송비용 그리고 탄소세의 합으로 정의하여 연구를 진행하였으므로, 향후 발주비용을 포함한 보다 현실적인 물류비용 모델을 통해 JIT 배송체계에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호 09첨단도시A01)에 의해 수행한 결과의 일부임.



## 참고문헌

- 김대홍 (2003). “JIT구매 하에서의 단일제품의 통합재고모형에 관한 연구”, 산업경영시스템학회지, 제26권 제3호, 한국산업경영시스템학회, pp. 50-57
- 김상훈 외 (2004). “건설공사의 적정 Lot Size 결정에 의한 효율적인 재고관리 방안에 관한 연구”, 한국건축시공학회지, 제4권 제2호, 한국건축시공학회, pp. 73-80
- 김응이 (2009). “화물자동차운송산업의 효율성 분석”, 한양대학교 박사학위 논문
- 서선덕 (2001). 한국철도의 르네상스를 꿈꾸며, 삼성경제연구소
- 오세조 (2001). 손에 잡히는 유통&마케팅, 중앙경제평론사, pp. 1-320
- 이상수 (1992). “JIT 방식이 원가회계에 미치는 영향: 활동중심 원가계산의 도입”, 회계학연구, 제14호, pp. 93-107
- 정정우 (2007). "공급사슬에서의 생산 및 운송 계획의 동기화", 한양대학교 박사학위 논문
- 토마스 골즈비 외 (2006). 린 6시그마 로지스틱스, 동북아물류혁신클러스터 역, 범한, pp. 1-314
- Billesbach, T. J., Harrison, A. and Croom-Morgan, S. (1991). “Supplier Performance Measures and Practices in JIT Companies in the US and the UK”, International Journal of Purchasing and Materials Management, Vol. 27 No. 4, pp. 8-24
- Farzaneh F. (1997). “A Comparative Analysis of Inventory Costs of JIT and EOQ Purchasing”, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 27 No. 8, pp. 496-504
- Frank, P. and Joseph, R. (1989). “A Recursive Algorithm for Order Cycle-Time that Minimizes Logistics Cost”, The Journal of the Operational Research Society, 40(4), pp. 367-377
- International Energy Agency (2009). CO2 Emissions from Fuel Combustion Highlights, 2009 ed., International Energy Agency
- Kwak, S. (1995). “Policy Analysis of Hanford Tank Farm Operations with System Dynamics Approach”, Doctoral Thesis, Department of Nuclear Engineering, MIT, Cambridge, MA, pp. 34-36
- Nathan B. F. (2000). A. T. Kearney Inventory Distribution Simulator, ver. 1.0b, A. T. Kearney Inc., Atlanta
- Pan, A.C. and Liao, C. (1989). “An Inventory Model under Just-in-Time Purchasing Agreement”, Production and Inventory Management Journal, 1st quarter, pp. 49-52
- Peña-Mora and Park M. (2001). “Dynamic Planning for Fast-tracking Building Construction Projects”, Journal of Construction Engineering and Management, 127(6), pp. 445-446
- Ramasesh, R. V. (1990). “Recasting the Traditional Inventory Model to Implement Just-in-Time Purchasing”, Production and Inventory Management Journal, 1st quarter, pp. 71-75
- Rudiger D. and James, M. (1991). Global warming: economic policy responses, MIT Press, Cambridge
- Stern, L. (2006). Stern Review on the Economics of Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge
- Sterman, J. (2000). Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World, McGraw-Hill Companies, New York, NY
- Svensson G. (2001). “Just-in-Time: the Reincarnation of Past Theory and Practice”, Focus on Management History, Management Decision, pp. 866-879
- Turek, M. (1995). “System Dynamics Analysis of Financial Factors in Nuclear Power Plant Operations”, MS Thesis, Department of Nuclear Engineering, MIT, Cambridge, MA

논문제출일: 2010.11.11

논문심사일: 2010.11.19

심사완료일: 2011.01.12

---

## Abstract

The term 'green' has become an important way of survival for the construction industry in 21th century in accordance with the emergence of the environmental crisis due to the climatic change. Especially the policy of carbon taxation, planed to be introduced from 2012, is expected to be a considerable burden to the construction industry which has abundant carbon emission during the resource transportation due to the complexity of resources and local distribution of the construction sites.

In this regard, this study shows an optimizing strategy for delivery frequency, which downsizes the net distribution costs based on the assumption that, despite of its other advantagements, the frequent small lot mode of JIT delivery would take negative effects due to the increase of costs of transportation and carbon emission once the carbon taxation policy carried out. To simulate the efficiency of the management strategies, the System Dynamics modeling has been used. The results show that the frequent small lot transportation strategy is now always efficient method to these changes, and that the frequency of transportation should be re-determined according to the extent of the imposition of carbon tax. This study provides the conceptual frame for an efficient management of transportation system of the construction industry, showing necessity of change of the resource transportation systems through analysing JIT deliver system in accordance with the global changes in environmental economy.

**Keywords :** *Just-In-Time, Delivery Frequency, Logistics Cost, Carbon Tax, System Dynamics*

---