

# 재고이론에 의한 화물 수송수단 선택 모형에 관한 연구

허 운 수<sup>1)</sup>, 남 기燦<sup>2)</sup>

## Inventory Theoretic Models for Freight Mode Choice

Yun-Su Hur , Ki-Chan Nam

### Abstract

The inventory theoretic models for freight mode choice evaluate transportation-inventory decisions jointly from a total logistics cost perspective in an uncertain demand and lead time environment. In line with discrete choice models these are typical ones that are used to analyse shippers' transportation decision. This paper reviews the inventory theoretic approach with emphasis on the implementation in stochastic transportation choice models, and applies this approach to evaluate transportation decision.

The major findings are as follows : First, the most appropriate approach is that suggested by Tyworth with  $P_2$ (fill-rate) as a safety stock criterion. Second, the proposed approach is very effective one to evaluate the impacts of lead time and fill-rate on the order quantity(Q) and reorder point(s). To a given situation, for railway transportation and coastal transportation, long lead time appears to be more economic than road transportation(via ODCY) when

1) 한국해양대학교 항만운송공학과 석사과정 수송계획 전공

2) 한국해양대학교 물류시스템공학과 조교수

consistency is at a high level. When road transportation(via ODCY) for the traffic of beverages and groceries is switched to alternative mode, total logistics cost is decreased by about 16% to 28.15%.

## 1. 서 론

화물 수송은 재화의 공간적 차이를 극복하여 경제·사회 활동을 원활하게 수행할 수 있는 기본적 기능을 수행한다. 즉 원자재, 제품, 반제품, 완제품의 공간적 이동을 통하여 재화의 장소적 효용과 시간적 효용을 창출하는 것이다. 재고란 원자재, 반제품, 완제품뿐만 아니라 미래의 생산에 사용하거나 수요에 대처하기 위해 현재 사용되고 있지 않는 경제적 자원으로 보관을 통하여 시간적 간격을 극복하는 기능을 한다. 이와 같이 물류는 공간적 시간적 간격을 메우는 역할을 하며, 공간적 간격을 극복하는 수송과 시간적 간격을 극복하는 보관이 주요 기능이 된다.

건설교통부자료(1995)에 따르면 1994년 우리나라의 물류비는 총 47조7천억원으로 국내 총생산액(GDP) 대비 15.7%에 달하며, 94년 총물류비는 84년에 비해 규모 면에서 4.2배 증가한 것으로 이 기간 동안 연 평균 15.5%의 높은 증가율을 보이고 있다. 총물류비의 구성은 수송비 65.0%, 재고유지관리비 23.0%, 포장비 2.3%, 하역비 1.9%, 물류정보비 3.8%, 일반관리비 4.1%로 수송비와 재고관리비가 대략 88%에 달하고 있어서 기업차원에서의 수송과 재고관리의 중요성을 알 수 있다.

수송부문에 있어서 주요 의사결정문제 가운데 하나는 수단선택이다. 초기 연구에서는 직접 수송비를 중심으로한 비용최소화 관점에서 수단선택 문제를 다루었으며, 그 이후 총물류비 관점에서 비용이 최소가 되는 수단을 선택한다는 재고이론모형과 효용극대화 이론을 바탕으로하여 의사결정자의 행태를 분석하는 이산선택모형(남기찬, 1993) 등이 개발되었다.

재고이론에 근거한 수송수단 선택 모형은 수송과 재고비용간의 트레이드 오프(trade-offs) 분석을 기초로 한다. 즉, 빠른 수송수단을 이용하면 수송비용은 증가하지만 재고수준이 낮아져서 재고비용이 감소되며, 반면에 느린 수송수단을 이용하면 수송비용은 감소하지만 재고수준이 증가하여 재고비용이 증가하게 된다는 것이다. 이러한 관점에서 제품을 수송하는데 소요되는 총비용을 도출하고, 비용이

최소가 되는 수송수단을 선택하게 된다. 효용극대화 이론에 근거한 이산선택모형이 화주의 의사결정 행태를 분석하는데 유효한 반면에, 수송과 재고비용의 트레이드 오프를 기초로 하는 재고이론모형은 화물 수송수요에 대한 수송시간과 신뢰도의 영향을 평가하는데 유용하다.

따라서 본 논문은 국외에서 발표된 관련 연구들을 중심으로 재고이론에 근거한 화물 수송수단 선택 모형의 이론적인 고찰과 적용을 통하여 이 분야의 발전에 기여하고자 한다. 이를 위하여 본 논문은 두 가지의 목적을 가진다. 첫째, 주 관심 부분인 리드타임 동안의 수요를 나타내는 방법과 수송시간의 신뢰도와 관련된 안전재고 측정 및 기준에 대한 연구 현황과 지금까지의 연구진전 정도를 밝히고 앞으로의 연구 방향을 제시한다. 둘째, 이러한 방법론을 단순화시킨 실제 상황에 적용하여 화물 수송수단 선택에 따른 수송수단의 리드타임과 신뢰도의 변화와 기업의 서비스 수준(충족률) 변화로 인한 총물류비용의 변화를 분석하여 본 방법론의 유용성을 밝힌다.

## 2. 재고와 수송비용 트레이드 오프의 이론적인 고찰

물류의 기능 중 수송비와 보관을 통한 재고유지비용은 총물류비의 약 3/4 이상을 차지할 정도로 그 중요성이 크다. 따라서 총물류비용 절감을 위한 물류합리화를 수행할 때 수송과 재고관리로부터 시작하게 되면 그 효과도 가장 크게 나타나게 된다. 수송시간은 수송수단에 따라 달라질 수 있으며, 이는 적정 고객서비스 수준을 유지하기 위해 필요한 안전재고 등 재고유지비용에 영향을 미치게 된다. 따라서 수송에서 발생하는 직접적인 수송비용과 재고유지비용간의 트레이드 오프를 잘 파악하여 총물류비용에 입각한 수송수단 선택 및 재고관리 의사결정의 중요성을 강조하고 있다.

### 2.1 재고와 수송비용의 트레이드 오프

비계량적인 요소를 제외할 경우, 수송수단을 선택할 때에는 그 수송서비스를 이용하였을 때의 직접비용뿐만 아니라 이와 관련된 재고비용을 고려하여야 한다.

즉, 수송중에 있는 재고뿐만 아니라 화주의 재고수준은 각 수송수단의 수송시간이나 신뢰도에 큰 영향을 받는다. 수송시간이 길고 신뢰성이 떨어지는 수송수단을 이용하게 되면 유통경로상의 재고는 많아지게 된다. 이것은 수송서비스에 대한 비용을 절감하려는데 따른 결과로 볼 수 있다. 따라서 화주는 주어진 수송수단 선택 대안 중에서 재고비용을 포함하여 수송에 따르는 총비용이 가장 낮은 수송수단을 선택해야 한다.

다른 측면으로 각 기업이 수송수단을 선택할 때 경쟁우위 측면도 고려할 수 있다. 즉, 화주가 여러 공급업자로부터 제품을 구입할 경우, 가격뿐만 아니라 물류서비스의 질에 의해서도 영향을 받게 된다. 화주는 더 좋은 수송서비스(신속성, 신뢰성)를 받을 수 있다면 재고수준을 낮출 수 있을 뿐만 아니라 보다 확신을 가지고 사업계획을 추진할 수도 있는 것이다. 따라서 화주는 좋은 수송서비스를 제공하는 공급업자를 더욱 선호하게 마련이다. 이 경우 공급업자는 비용을 더 지불하더라도 매출 증대를 위해 화주가 원하는 서비스를 제공하는 수송수단을 선택하게 된다.

## 2.2 재고이론에 근거한 화물 수송수단 선택 모형

재고이론을 통한 수송수단 선택 모형은 본래 화물 수송수요의 연구로부터 출발하였으며, 후에 출발지에서 목적지까지의 총물류비용 관점에서 수송과 재고비용 사이의 트레이드 오프 분석과 해법과정을 포함한다.

재고이론에 근거한 수송수단 선택 모형의 이론적인 구조는 수송, 재고, 그리고 제품 요소로 구성된다. 수송은 각 수단 또는 서비스의 특성을 나타내는 운임, 수송시간, 그리고 수송시간의 신뢰도로 나타난다. 재고는 두 가지 기본 기능 즉, 주문과 주기재고, 안전재고 그리고 수송중인 재고를 포함하는 재고유지로 나타난다. 이때 재고는 수송서비스 요소들과 밀접한 관련이 있다. 수송시간은 안전재고와 수송중인 재고에 직접적으로 영향을 미치며, 신뢰도는 안전재고에 영향을 미친다. 즉, 빠른 수송수단을 이용하면 수송비용은 증가하지만 재고수준이 낮아져서 재고비용이 감소되며, 반면에 느린 수송수단을 이용하면 수송비용은 감소하지만 재고수준이 증가하여 재고비용이 증가하게 된다는 것이다. 안전재고는 불확실한 수송시간 등에 대비하여 보유하는 재고이기 때문에 수송시간의 신뢰도에 의해 직접 좌우된다. 제품은 수송과 재고 요소들이 특정 제품과 결합한 결과이다. 즉, 특정 제품의 수송과 재고특성으로 인하여 발생하는 물류비용(수송, 주문, 재고유지비용)

과 제품에 대한 서비스 기준으로서 재고부족량비용 혹은 제품의 서비스 수준으로 이루어진다.

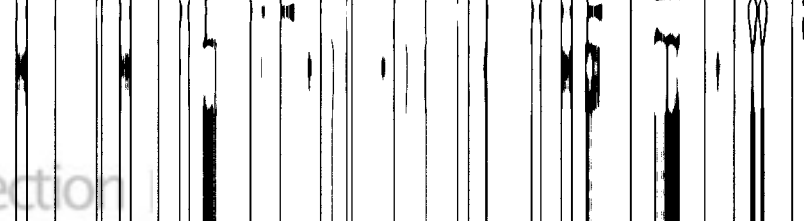
수송 재고비용 트레이드 오프 틀은 이론적인 구조를 수식화하고 수송시간이 재고비용에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 이와 같은 분석은 수요와 리드타임이 확실할 때 비교적 간단하지만, 수요와 리드타임이 불확실한 경우 안전재고 수준, 주문량 등이 불확실해지며, 그 결과 리드타임과 수요에 대한 총물류비용 관계가 복잡해지기 때문에 해를 구하는 과정 역시 복잡하게 된다. 따라서 리드타임 동안의 수요를 나타내는 방법과 수송서비스와 관련된 안전재고 측정 및 기준에 대한 다양한 방법이 연구의 주 관심사가 된다.

### 3. 리드타임 수요 및 안전재고 결정에 대한 이론적인 고찰

일반적으로 수송과 재고비용간의 트레이드 오프 관계를 포함하는 모형들은 리드타임과 수요를 확정적(deterministic)인 것으로 가정하는 접근법과 확률적(stochastic)인 것으로 가정하는 접근법으로 구분할 수 있다. 전자는 제품의 수요율을 정확하게 알고 있거나 일정하며 리드타임은 수요와 무관하며 상수로써 일정하다고 가정하는 것이다. 이것은 복잡한 현실을 단순화하는 많은 가정들을 내포하기 때문에 실제 상황을 잘 반영하기가 어렵다.

리드타임과 수요를 확률적으로 다루는 수송 문제의 일반적인 형태는 수요가 독립적인 제품의 수송에 있어서 복수의 수송수단이 이용 가능한 하나의 경로(공급자-소비자)에 한정된다. 문제는 확률적인 특성을 지닌 수송수단  $T$ , 재주문점  $s$ , 그리고 미리 설정된 서비스 수준에 대한 연간 기대 수송비용과 기대 재고비용의 합계를 최소화하는 주문량  $Q$ 를 결정하는 것이다. 이러한 시스템은 재고관리 관점에서 잘 알려진  $(s, Q)$ 모형을 확장한 것이며, 문제를 해결하기 위해서는 재고유지비용에 대한 수송시간과 신뢰도의 영향을 평가해야 한다. 리드타임과 수요가 확률적임을 가정하면 현실 상황을 보다 잘 묘사할 수 있으나 계산적인 어려움이 따른다. 따라서 많은 연구에서 리드타임 동안의 수요를 더 정확하게 나타내기 위한 접근

법과 해법과정을 간단하게 하기 위한 방법들이 모색되었다.



과 제품에 대한 서비스 기준으로서 재고부족량비용 혹은 제품의 서비스 수준으로 이루어진다.

수송 재고비용 트레이드 오프 틀은 이론적인 구조를 수식화하고 수송시간이 재고비용에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 이와 같은 분석은 수요와 리드타임이 확실할 때 비교적 간단하지만, 수요와 리드타임이 불확실한 경우 안전재고 수준, 주문량 등이 불확실해지며, 그 결과 리드타임과 수요에 대한 총물류비용 관계가 복잡해지기 때문에 해를 구하는 과정 역시 복잡하게 된다. 따라서 리드타임 동안의 수요를 나타내는 방법과 수송서비스와 관련된 안전재고 측정 및 기준에 대한 다양한 방법이 연구의 주 관심사가 된다.

### 3. 리드타임 수요 및 안전재고 결정에 대한 이론적인 고찰

일반적으로 수송과 재고비용간의 트레이드 오프 관계를 포함하는 모형들은 리드타임과 수요를 확정적(deterministic)인 것으로 가정하는 접근법과 확률적(stochastic)인 것으로 가정하는 접근법으로 구분할 수 있다. 전자는 제품의 수요율을 정확하게 알고 있거나 일정하며 리드타임은 수요와 무관하며 상수로써 일정하다고 가정하는 것이다. 이것은 복잡한 현실을 단순화하는 많은 가정들을 내포하기 때문에 실제 상황을 잘 반영하기가 어렵다.

리드타임과 수요를 확률적으로 다루는 수송 문제의 일반적인 형태는 수요가 독립적인 제품의 수송에 있어서 복수의 수송수단이 이용 가능한 하나의 경로(공급자-소비자)에 한정된다. 문제는 확률적인 특성을 지닌 수송수단  $T$ , 재주문점  $s$ , 그리고 미리 설정된 서비스 수준에 대한 연간 기대 수송비용과 기대 재고비용의 합계를 최소화하는 주문량  $Q$ 를 결정하는 것이다. 이러한 시스템은 재고관리 관점에서 잘 알려진  $(s, Q)$ 모형을 확장한 것이며, 문제를 해결하기 위해서는 재고유지비용에 대한 수송시간과 신뢰도의 영향을 평가해야 한다. 리드타임과 수요가 확률적임을 가정하면 현실 상황을 보다 잘 묘사할 수 있으나 계산적인 어려움이 따른다. 따라서 많은 연구에서 리드타임 동안의 수요를 더 정확하게 나타내기 위한 접근법과 해법과정을 간단하게 하기 위한 방법들이 모색되었다.

전통적인 접근법은 리드타임( $t$ )과 수요( $d$ )를 개별적으로 모형화하고 이들을 포함하는  $L$ 의 결합통계분포를 도출하는 것이며, 재고 제품의 리드타임 수요는 식 (1)과 같이 확률 기간 수요의 확률 합계로 정의된다. 그리고  $L$ 을 구하는데 있어

서  $d$ 와  $t$ 의 와선(convolution)을 무시하고  $L$ 을 정규분포와 같은 단순한 통계 형태로 둔다.

$$L = \sum_{j=1}^k d_j \quad (1)$$

$$\mu_L = \mu_t \cdot \mu_d \quad (2)$$

$$\sigma_L^2 = \mu_t \cdot \sigma_d^2 + \mu_d^2 \cdot \sigma_t^2 \quad (3)$$

$L$  : 리드타임 동안의 수요

$d$  : 일일 또는 기간(period) 수요(독립적이고 정적인 확률 변수)

$t$  : 리드타임(독립적이고 정적인 확률 변수)

또한  $d$ 와  $t$ 의 평균과 표준편차는 알고 있거나 측정할 수 있고,  $L$ 의 평균과 분산은 식 (2)와 (3)을 이용한다고 가정한다. 식 (2)는 수송중인 재고( $\mu_t \cdot \mu_d$ )의 계산에 있어서 수송시간( $\mu_t$ )의 영향을 나타내며, 식 (3)은 리드타임 수요의 표준편차( $\sigma_L$ )와 안전재고( $k\sigma_L$ )에 대한 수송시간( $\mu_t$ )과 신뢰도( $\sigma_t$ )의 영향을 나타낸다. 안전재고 승수( $k$ ), 또는 정해진 서비스 수준을 실현시키는 재주문점(s)을 결정하기 위해서  $L$ 의 분포를 이용하는 기본 재고이론을 적용하고, 특히 안전재고를 결정하는 서비스 기준으로는 일반적으로 주기당 재고고갈이 발생하지 않을 확률( $P_1$ )을 이용한다. 그러나 전통적인 접근법은 다음과 같은 두 가지 문제점을 가지고 있다.

리드타임 수요( $L$ )에 알맞은 형태의 결합분포(compound distribution)를 도출하는 것이 어렵다(Banks와 Spoerer, 1987). 즉 일반적인 통계분포로 각기 다른 상황에서 가정되는  $L$ 에 대해 적합한 분포를 도출하는 것이 현실적으로 어렵다는 것을 의미한다. 이와 같은 이유 때문에  $L$ 이 정규분포라고 가정을 하는데 이것은 이론적이거나 경험적인 타당성이 부족하다. 따라서  $L$ 이 정규분포를 따른다는 가정은 부적절하며 잘못된 결과를 초래할 수 있다. Eppen과 Martin(1988) 그리고 Lau(1989)는 이와 같이 부적합한 가정은 오차가 큰 재고고갈 확률을 산출할 수 있다는 것을 보여준다. 또한, Mentzer와 Krishnan(1985), Banks와 Spoerer(1987)의 연구에서도  $L$ 에 대한 잘못된 가정이 재고 비용이나 재고고갈 비용을 증가시킨다는 것을 밝혔다.

전통적인 결합 접근법의 한계를 개선하기 위하여 Kottas와 Lau(1980)는 “first-four-moments(ffm)” 방법을 개발하였다. 이 방법은  $L$ 을 모수가 2개(평균, 분산)인 정규분포 대신에 4개의 모수를 가지는 분포를 사용하는 것이다. 모수가 4개인

분포의  $ffm$ (평균, 분산, 왜도(skewness), 첨도(kurtosis))은 통계적 분포의 일반적인 형태를 나타내기 때문에 모수가 2개 이하인 분포(포아송, 정규분포 등)보다 비정규 형태의 분포에 더 적합하다. 따라서 Kottas와 Lau는 리드타임 수요 모형에서 4개의 모수를 가지는 Schmeiser-Deutsch족 곡선을 사용할 것을 제의하였다. 또한 Kottas와 Lau는  $L$ 의 3차와 4차 적률(moment)을 구하기 위해  $d$ 와  $t$ 의  $ffm$  추정치를 사용하는 새로운 공식을 제안함으로써 이전의 수치 해석을 확장하였다. 이것은 식 (2)와 (3)을 결합하고,  $L$ 의 평균과 분산을 결정하며, 결합 리드타임 수요 분포의  $ffm$ 을 만들어낸다. 이러한 결과 값들은 4개의 모수를 가진 Schmeiser-Deutsch곡선에 맞게 사용되고, 재고고갈 위험( $1 - P_1$ )에 이르는  $s$ 값을 결정할 수 있게 한다. 그러나 80년대 말 Lau(1989)는 동일한 틀(framework)을 소개하면서 Pearson족 분포(type I, IV, VI)를 사용할 것을 추천하였다. Pearson곡선이 4개의 모수를 가진 다른 분포보다 더 정확하지는 않지만 Schmeiser-Deutsch곡선보다 안전재고량을 결정하는데 좀 더 편리한 과정을 제공한다고 하였다.

$ffm$  방법은 전통적인 방법보다 더 정확한 결과를 도출하는 장점이 있지만 몇 가지 한계를 내포한다. Kottas와 Lau에 의하면 리드타임 수요가 바이모달(bimodal) 형태일 때  $ffm$ 에서 사용한 피어슨곡선 형태와 맞지 않는 경우가 많다. 적용 측면에서의 문제로써, Banks와 Spoerer(1987)는 2개 이상의 모수를 가지는 분포를 분석하는 쉽게 사용하지 않으며, 사용한다고 해도 요구되는 것과 같이 정확하게 계산하지 않을 수 있다고 언급했다. 결론적으로 피어슨곡선이 모수가 2개 이하인 이론적 통계 분포보다 비정규 형태에 일반적으로 더 가까운 근사치 모형을 도출하지만 이러한 모형이 반드시 올바른 해를 도출하는 것은 아니며, 더 나아가 실용성은 불분명하다.

Tyworth(1992) 접근법은 기간(period) 수요와 리드타임에 대한 확률 변수가 정적이고 독립적이라는 전통적인 가정을 따르지만, 리드타임 수요에 대해서는 리드타임 범위에 대하여 수요의 조건부 확률 분포가 “convex combination”을 이룬다는 Bank와 Fabrycky(1985) 그리고 Eppen과 Martin(1988)의 주장을 채택한다. 즉, 결합 분포로서  $L$  대신 조건부 기간 수요 분포( $d_{|t=}$ )의 convex combination을 이용하는 것으로 가장 큰 이점은 모형을 어렵게 하는 결합분포의 필요성을 제거한 것이다. 그리고 경험적인 확률을 사용하는 어떤 형태의 이산 리드타임 분포도 가정할 수 있기 때문에 모델링에 있어서 높은 유연성을 제공한다. 또한 Tyworth 접근법은 전통적인 접근법에서 발생하는 오차를 줄여서 재고고갈 비용 또는 재고유지 비용을 감소시킬 수 있으며, 총족률, 단위화물 크기, 재고수준과 재



고량, 수송요율 등의 동적인 트레이드 오프 분석을 용이하게 한다.

그러나 최초의 Tyworth 접근법은 일일 수요분포를 선택하는데 있어서 한계를 안고 있다. Tyworth 접근법의 가장 중요한 조건은 기간 수요 예측 오차(또는 기간 수요)들이 정규분포 또는 이산적인 포아송분포를 따른다는 것이다. 포아송분포는 단지 1개의 모수만을 가지기 때문에 가정할 수 있는 분포 형태의 범위가 매우 제한적이다. 또한 평균 수요가 적을 때 포아송분포는 우측으로 크게 왜도 되고, 평균 수요가 증가함에 따라 대칭적이게 된다. 이러한 한계는 빠르게 수송되는 제품에 대해 쉽게 적용될 수 있을 뿐만 아니라 느리게 수송되는 제품의 모형에 대해서도 이상적인 감마분포를 사용할 것을 제안한 Keaton(1995)에 의해 부분적으로 극복되었다. Keaton은 감마분포 수요와 확률적 리드타임 조건하에서 부족량 비용 기준이나 충족률 서비스 목표를 만족하는 재주문점( $s$ )을 구하는 해법을 제시하였으나 이것은 미리 지정된  $Q$ 값에 대하여 재주문점을 찾는 것이기 때문에 일반적으로 지정된 서비스 또는 재고 부족량 비용 기준에 대하여 총 비용을 최소화하는  $Q$ 와  $s$ 를 구하는 것임을 고려할 때 한계가 있다. 최근 Tyworth(1996)는 이러한 점을 감안하여 정해진 서비스 수준과 재고부족량비용 조건에서  $s$ 와  $Q$ 를 구하는 새로운 방법을 제시하였으나 비용을 최소화 하는 재주문점과 주문량에 초점을 맞춘 관계로 수송수단 관련 비용항목을 무시하였다.

안전재고를 결정하는 기준은 크게 서비스 기준( $P$ 형)과 부족량비용 기준( $B$ 형)으로 구분되며, 서비스 기준은  $P_1$ (주기당 재고고갈이 없을 확률)과  $P_2$ (충족률) 기준과 부족량비용 기준으로 대표적인 것은  $B_2$ (단위 부족당 지정된 비율 비용) 기준이다. 특히  $P_2$  기준은 평가되는 각 수송수단에 대하여 동일한 연간 기대 주문 충족 수준에 도달할 수 있는 안전재고 수준을 계산할 수 있게 하기 때문에 수단들을 일관성 있게 비교할 수 있는 장점이 있다. 또한 전통적인 접근법에서 사용하는  $P_1$  또는  $B_2$  기준보다 더 나은 결과(재주문점, 안전재고량 등)를 도출하며, 실제로 많은 기업들이  $P_2$  서비스 측정을 선호한다고 알려졌다.(Tyworth, 1992).

## 4. 수송수단 선택에 따른 총물류비용 분석

### 4.1. 모형 및 자료

본 연구에서는 수송수단 선택이 총물류비용에 미치는 영향을 분석하기 위해서

리드타임 수요를 다루는 방법으로서 Tyworth의 새로운 접근법을 따른다. 특히 일일 수요 분포로는 측정 단위의 적절한 척도를 가지면서, 빠르게 수송되는 제품뿐만 아니라 느리게 수송되는 제품의 모형에 쉽게 적용되고 높은 유연성(flexible)을 가지는 감마분포를 따른다고 가정한다. 안전재고량을 결정하는 기준으로는 각기 다른 수송수단에 대해 일관성 있게 비교할 수 있는  $P_2$  기준을 사용하며, 총 비용 방정식은 이전의 Tyworth 접근법을 따른 모형을 확장하여 수송비용 및 수송중인 재고비용 항목을 포함시켜 수송수단이 총물류비용에 미치는 영향을 파악한다.

주문량  $Q$ 가 입고된 시점에서 다른 주문량  $Q$ 가 입고되는 시점까지를 주기라고 하면, 한 주기에 대한 각각의 항목은 주문비용, 재고유지비용, 수송중인 재고유지비용, 수송비용으로 구성된다. 즉 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A + PW \frac{Q}{D} \left( \frac{Q}{2} + s - \mu_L \right) + VY \frac{\bar{t}_i}{365} Q + RQ \quad (4)$$

$A$  : 주문비용(원)

$\bar{D}$  : 연간 기대 수요(일일수요 평균  $\times$  360(일))

$Q$  : 경제적 주문량

$W$  : 연간 재고유지비용(%)

$s$  : 재주문점

$\mu_L$  : 리드타임 동안의 평균 수요

$Y$  : 수송중 재고비용(%)

$t_i$  :  $i$  수단 평균 수송시간(일, 리드타임으로 가정)

$V$  : 단위당 제품 가격(원/TEU)

$R_i$  :  $i$  수단에 대한 수송비용(원,  $i=1$ (공로),  $2$ (철도),  $3$ (해송))

식 (4)의 주기당 총물류비용에 연간 평균 주기수  $\bar{D}/Q$ 를 곱함으로써 연간 총물류비용의 함수식은 다음과 같이 도출되어진다.

$$TC_i = \frac{A\bar{D}}{Q} + VW \left( \frac{Q}{2} + s - \mu_L \right) + VY \frac{\bar{t}_i}{365} \bar{D} + R_i \bar{D} \quad (5)$$

$TC_i$  : 기대 총연간비용( $i$  : 수송수단)

따라서 문제는  $TC_i$ 를 최소화하고 원하는 서비스( $P_2$ ) 목표에 도달하는  $s$ 와  $Q$  값과 수송수단을 결정하는 것이다. 이러한 문제의 해결을 위해서, 우선 주문-충족 서비스 수준을 계획하는 목표 부족량으로 전환한 후 기대 부족량(expected shortages)과 비교한다.

$TS$ 를 재충족 주기당 단위부족의 목표량(the target number of units short per replenishment cycle)으로 정의하면,  $P_2$ 의 주문-충족 목표에 대한 연간 목표 단위 부족량은  $(1-P_2)\bar{D}$ 이 된다. 그리고 연간 목표 단위 부족량은 연간 평균 주기 횟수( $\bar{D}/Q$ )를 가지기 때문에  $\bar{D}/Q$ 로 나누어주면,  $TS$ 는  $(1-P_2)Q$ 로 정의할 수 있다.

$ES$ 를 재충족 주기당 기대 단위 부족량(the expected number of units short per replenishment)으로 정의하면, 감마분포 수요와 확률적 리드타임의 경우에 대한  $ES$ 는 아래와 같은 감마분포 손실 함수( $G(s)$ )를 이용하여 계산할 수 있다.

$$G(s) = \int_s^{\infty} (L_o - s)f_L(L_o)dL_o \quad (6)$$

여기서  $s$ 는 재주문점이고  $f_L(\cdot)$ 는  $L$ 의 감마분포 확률밀도함수(pdf)이다.  $L$ 이  $d$ 와  $t$ 의 와선(convolution)을 나타내고 감마분포를 따른다고 가정하면,  $G(s)$ 를 이용하여  $ES$ 를 구할 수 있다.

그러나 Tyworth 방법은  $d$ 와  $t$ 의 와선(convolution)보다는 리드타임에 대한 수요의 조건부 확률분포 집합으로써  $L$ 을 취급함으로써  $ES$ 를 계산한다. 따라서, 재충족 주기당 조건부 기대 부족량( $E(s | t=j)$ )은 다음과 같이 구할 수 있다.

첫째, 기간 수요  $d$ 는  $G(\alpha, \beta)$ 를 따르는 감마분포라고 가정한다. 여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 감마분포의 형태(shape)와 척도(scale) 모수이다. 감마분포를 따르는  $d$ 의 평균( $\mu_d$ )과 분산( $\sigma_d^2$ )은  $\alpha\beta$ 와  $\alpha\beta^2$ 로 정의되어진다. 그리고 감마분포의 모수는 적률법(method of moments)을 이용하여 표본의 평균과 분산으로부터  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구할 수 있다( $\alpha = \mu_d^2/\sigma_d^2$ ,  $\beta = \sigma_d^2/\mu_d$ ). 더 나아가  $d$ 의 확률밀도함수(pdf)는 다음과 같이 표현된다.

$$f(d | \alpha, \beta) = \frac{d^{\alpha-1}e^{-d/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (7)$$

여기서  $\Gamma(a)$ 는 아래와 같이 정의된 감마함수이다.

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt \tag{8}$$

물때, 리드타임  $t$ 는  $P_j = P(t=j)$ 가 0값을 가지지 않는 이산확률분포로 가정한다.  $j = 1, 2, \dots, n$ 에 대해  $t=j$ 일 때의 수요의 조건부 분포는  $G(j\alpha, \beta)$ 이고, 여기서  $n$ 은 최대 리드타임이다.  $t=j$ 에 대한 조건부 기대 단위 부족은 식 (9)과 같이 정의 할 수 있으며, 이를 정리하면 식 (10)과 같다.

$$ES_j = E(s | t=j) = \int_s^{\infty} (u-s) dG(j\alpha, \beta) \tag{9}$$

$$E(s | t=j) = j\alpha\beta(1 - G_1(s)) - s(1 - G_0(s)) \tag{10}$$

여기서  $G_0$ 와  $G_1$ 는 감마함수  $G(j\alpha, \beta)$ 와  $G(j\alpha+1, \beta)$ 의 누적분포이다. 따라서 앞에서 언급한 것처럼 재충족 주기당 기대 단위 부족량( $ES$ )은 조건부 기대 부족량의 가중평균(weight average)으로 정의된다.

$$ES = \sum_{j=1}^n P_j ES_j \tag{11}$$

이상과 같이 리드타임에 대한 분포와 수요에 대한 감마분포의 모수값이 결정되면 다음과 같은 제약조건으로 비선형 해법을 이용한다.

$$\begin{aligned} ES &< TS \\ s &\geq 0 \\ Q &> 1 \end{aligned} \tag{12}$$

결론적으로 재고관리 측면의 의사결정에 있어서 화주는 총물류비용을 최소화 하는 주문량(Q), 재주문점(s) 그리고 수송수단을 선택할 것이다. 이것은 또한 수송수단의 선택이 재고비용에 중요한 영향을 끼친다는 것을 의미한다. 다음절에서는 엑셀을 이용하여 각 수송수단에 대해 기대 총연간비용(ETAC)을 최소화하는 재주문점(s), 주문량(Q)을 결정하고 그에 따른 비용을 분석하는 과정을 사례를 통해서 살펴본다.

본 연구에서는 적용예의 효율적인 분석을 위해 이전연구와 거시적 측면에서 제

품을 품목별로 그룹화한 통계자료집을 근거로 하여 분석에 필요한 자료를 집계하였다(음료 및 식료품: 제품가격-13,000,000원, 주문비용-650,000원, 재고유지비-12.7%, 물류통계자료집, 1995). 또한 모든 제품의 수요는 최근 문헌에서 일관되게 적용되는 감마분포  $G(2, 0.5)$ 를 따르는 것으로 가정하였으며, 서비스 수준으로서는 95%의 제품 충족률을 가정하였다(Keaton, 1995, Tyworth et al., 1996).

각 수송수단에 대한 수송비용은 교통개발연구원의 연구보고서 자료를 토대로 하여 BCTOC에서 직반출하여 경인지역으로 수송되거나 또는 BCTOC에서 부산에 산재해 있는 ODCY를 경유하여 경인지역으로 수송되는 경로에 대하여 도출하였다. 철송과 연안해송의 경우 공로수송과의 형평성을 기하기 위하여 인천항과 부곡CY에서 화주까지의 문전수송비는 제외하였다(철도수송(직반출): 251,387원, 철도수송(ODCY경유): 296,416원, 공로수송(직반출): 330,774원, 공로수송(ODCY경유): 330,074원, 연안해송(직반출): 252,649원, 연안해송(ODCY경유): 304,949원). 각 수송수단에 대한 수송시간은 이전 연구의 결과를 토대로 가정하였다.

#### 4.2. 분석 및 결과

음료 및 식료품은 <표 4-1>에서와 같이 1회 주문량(Q)과 재고수준(s)은 모든 수송수단에 대해 동일하게 나타남으로써 재고유지비용과 주문/가동비용이 유사하게 나타난다. 재주문점(s)은 평균 수송시간과 분산이 증가함에 따라 공로수송(직반출)에서 연안해송(ODCY)으로 증가함을 알 수 있다. 기대 총연간비용(ETAC)은 수송비용이 높은 비중을 차지하여 철도수송(직반출)에서 가장 낮게 나타난다. 공로수송(ODCY경유)에서 철도수송(직반출)으로 수송수단을 전환할 때 최고 28%의 총물류비용이 절감될 수 있다는 것을 알 수 있다.

<표 4-2>는 기대 총연간비용이 가장 높은 수송수단을 가장 낮은 수송수단으로 대체할 때 절감되는 비용의 비율을 나타낸다. ODCY를 경유하는 공로수송에서 직반출하는 철도수송을 이용하면 17.4%~28.7%까지 기대 총연간비용을 감소시킬 수 있다. 이와 같은 분석을 통하여 화주가 적절한 주문량과 재주문점으로 리드타임이 긴 철도수송이나 연안해송을 이용한다면 낮은 수송요율로 인하여 총물류비용을 절감시킬 수 있음을 알 수 있다.

<표 4 1> 음료 및 식료품

단위 : 원, TEU

항목	수단		공로수송		철도수송		연안해송	
	직 반 출	ODCY경유	직 반 출	ODCY경유	직 반 출	ODCY경유	직 반 출	ODCY경유
ETAC	124,636,906	140,354,147	100,849,148	114,362,801	101,231,600	116,927,709		
주문량(Q)	15	15	15	15	15	15		
재주문 점(s)	4.89	9.11	9.11	10.93	10.93	11.49		
재고수준	7.68	7.68	7.68	7.68	7.68	7.68		
재고유지비용	12,717,255	12,744,691	12,693,591	12,750,517	12,749,417	12,755,515		
주문/가동비	12,687,451	12,687,251	12,687,257	12,687,484	12,687,484	12,687,494		
수송비용	99,232,200	114,922,200	75,416,100	88,924,800	75,794,700	91,484,700		

<표 4 2> 수송수단 대체시 총물류비용 절감

구 분	수송수단		비용절감
음료 및 식료품	공로수송(ODCY)	⇒ 철도수송(직반출)	28.0%
섬유 및 의류	공로수송(ODCY)	⇒ 연안해송(직반출)	22.6%
피혁 제품	공로수송(ODCY)	⇒ 철도수송(직반출)	17.4%
목재 및 나무제품	공로수송(ODCY)	⇒ 철도수송(직반출)	23.7%
종이 및 종이 제품	공로수송(ODCY)	⇒ 철도수송(직반출)	28.7%
화합물 및 화학제품	공로수송(ODCY)	⇒ 철도수송(직반출)	25.2%
제 1차 금속제품	공로수송(ODCY)	⇒ 철도수송(직반출)	25.1%

## 5. 결론 및 추후 연구 방향

재고이론을 바탕으로한 화물 수송수단 선택 모형은 기업차원의 일반적인 수송 수단 선택 문제에서 수반되는 물류비용(수송비, 재고비 등)의 트레이드 오프를 포함하고 문제 해결을 위한 기본적인 분석 틀을 제공한다. 이러한 분석 틀을 이용하

여 연간 총수송비용과 재고비용을 최소화하는 수송 대안과 재주문점 및 주문 크기를 결정하는 것이다.

리드타임과 수요는 크게 확정적(deterministic)인 경우와 확률적(stochastic)인 경우로 구분되는데 대부분의 재고이론적 접근법들은 현실 상황을 보다 잘 묘사하는 확률적 리드타임과 수요를 가정하며, 특히 계산적인 어려움을 내포하고 있는 리드타임 동안의 수요를 더 정확하고 간단하게 나타내기 위한 연구들이 시도되었다.

접근법으로는 리드타임 수요가 정규분포라고 가정하는 전통적인 접근법(결합 방법), 적률법을 이용한 Kottas와 Lau가 제안한 first-four-moments 접근법, 그리고 결합분포의 필요성을 제거한 Tyworth의 접근법이 있다. 안전재고를 결정하는 기준에는 크게 서비스 수준( $P$ 형)과 부족량비용 기준( $B$ 형)으로 구분하며, 특히  $P_2$  기준은 평가되는 각 수송 수단에 대하여 동일한 연간 기대 주문-충족 수준에 도달할 수 있는 안전재고 수준을 계산할 수 있기 때문에 평가하는 수단들을 일관성 있게 비교할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수송시간에 따른 재고비용의 영향을 분석하기 위하여 Tyworth의 접근법을 사용하여 기존의 총 비용방정식에 수송중인 재고비용과 수송비용 항목을 추가하였고 안전재고 결정기준으로  $P_2$  기준을 사용하였다.

리드타임 및 충족률이 재고수준에 미치는 영향을 살펴보면, 낮은 충족률 수준에서는 평균 리드타임의 감소가 신뢰도 증가보다 재고수준에 더 큰 영향을 미치며, 높은 충족률(99%)에서는 평균 리드타임의 감소보다 신뢰도 증가가 재고수준을 감소시키는 것으로 나타났다. 그리고 리드타임이 긴 철도수송과 연안해송의 경우 신뢰도가 높을 때 공로수송보다 경쟁력이 높음을 보여준다. 수송수단을 전환할 때 연계되는 총물류비의 절감을 분석한 결과 음료 및 식료품 경우 공로수송(ODCY경유)을 다른 수송수단으로 대체할 경우 16%~28.15%의 범위에서 총물류비용이 절감되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 부산-경인축의 컨테이너 화물 수송을 대상으로 총물류비용에 미치는 수송수단의 영향을 분석하기 위해서 이전 연구와 통계 자료를 토대로 몇 가지 가정을 전제하였다. 특히 현실적인 자료의 한계로 인하여 제품간의 특성을 무시하고 모든 품목별에 대하여 동일한 제품 수요와 이산확률분포를 따르는 리드타임을 가정하였기 때문에 분석 결과를 해석할 때 이러한 현실적인 한계가 내포한다는 것에 유의할 필요가 있다. 따라서 앞으로의 연구는 보다 장기적인 기간을 두고 제품 특성을 잘 반영하는 수요와 각 수송수단의 수송시간의 분포를 정확히 조

사하고 제조업체에서 대외비로 취급되는 각종 비용 항목을 파악하여 현실에 적용할 수 있는 결과를 도출할 필요가 있다. 방법론적인 측면에서는 재고이론에 의한 수송수단 선택 모형이 현실을 보다 잘 반영할 수 있도록 총비용방정식에 대량 구매에 따른 구매 할인요소 및 대량 수송에 대한 효율할인 등을 고려할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- Banks, J. and Fabrycky, W. J.(1985), *Procurement and Inventory Systems Analysis*, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
- Banks, J. and Spoerer, J. P.(1987), "Inventory Policy for the Continuous Review Case: A Simulation Approach", *Annals of the Society of Logistic Engineer*, Vol. 1, No. 1, pp. 51-65.
- Eppen, G. D. and Martin, R. K.(1988), "Determining Safety Stock in the Presence of Stochastic Lead Time and Demand", *Management Science*, Vol 34, No. 11, pp. 1380-1390.
- Keaton, M.(1995), "Using the Gamma Distribution to Model Demand When Lead Time is Random", *Journal of Business Logistics*, Vol. 16, No. 1, pp. 107-131.
- Kottas, J. F. and Lau, H.(1980), "The Use of Versatile Distribution Families in Some Stochastic Inventory Calculation", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 31, No. 5, pp. 393-403.
- Lau, H. S.(1989), "Toward an Inventory Control System under Non normal Demand and Lead-time Uncertainty", *Journal of Business Logistic*, Vol. 10, No. 1, pp. 88-103.
- Mentzer, J. T. and Krishnan, R.(1985), "The Effect of the Assumption of Normality on Inventory Control/ Customer Service", *Journal of Business Logistics*, Vol. 6, No. 1, pp. 101-120.
- Tyworth, J. E., Guo, Y. and Ganeshan, R.(1996), "Inventory Control under Gamma Demand and Random Lead Time", *Journal of Business Logistics*, Vol. 17, No. 1, pp. 291-304.



