

□ 論 文 □

대물수송 체계 평가 개선 위 다목적  
貨物輸送體系의 評價와 改善을 爲한 多目的

Programming 모델

Multiobjective Transportation Infrastructure Development Problems  
on Dynamic Transportation Networks

이금숙  
李錦淑

(誠信女大 地理學科)

目

次

I. 序 論

- 1. 研究目的
- 2. 研究方法

II. 本 論

- 1. 理論的 背景
- 2. Intertemporal Storage Location -

Transportation Link Addition 모델

- 3. 多目的 Intertemporal Storage Location-Transportation Link Addition 모델

- 4. 모델의 適用과 必要한 資料

IV. 結 論

ABSTRACT

A commodity distribution problem with intertemporal storage facilities and dynamic transportation networks is proposed. Mathematical integer programming methods and multiobjective programming techniques are used in the model formulation. Dynamic characteristics of commodity distribution problems are taken into account in the model formulation. Storage facility location problems and transportation link addition problems are incorporated into the intertemporal multicommodity distribution problem. The model is capable of generating the most efficient and rational commodity distribution system. Therefore it can be utilized to provide the most effective investment plan for the transportation infrastructure development as well as to evaluate the

existing commodity distribution system. The model determines simultaneously the most efficient locations, sizes, and activity levels of storage facilities as well as new highway links. It is extended to multiobjective planning situations for the purpose of generating alternative investment plans in accordance to planning situations. Since the investment in transportation network improvement yields several external benefits for a regional economy, the induced benefit maximization objective is incorporated into the cost minimization objective. The multiobjective model generates explicitly the trade-off between cost savings and induced benefits of the investment in transportation network improvement.

## I. 序 論

경제가 발전하고 産業化가 진행됨에 따라 산업의 業種別·地域別 분화현상이 심화되어 지역간 貿易에의 依存度가 높아지게 된다. 따라서 지역간 화물의 수송량이 증가하게 되어 貨物輸送施設에 대한 수요가 증가하게 되므로 交通下部構造의 적절한 改善이 요구된다. 특히 급격한 經濟成長과 산업화의 과정을 이루고 있는 지역에서의 이러한 現象이 보다 深刻하게 擡頭될 것이다. 韓國은 지난 20여년 간 世界에서 가장 빠른 경제성장을 보이고 있는 국가들 중의 하나로 그동안 地域間 貨物運送量은 急增한데 반하여 貨物輸送體制은 아직 크게 未洽한 상태이며 그 운영도 非效率的인 상태를 벗어나지 못하고 있는 實情이다. 그 結果로 교통로의 혼잡과 운송비의 昂騰을 가져와서 商品의 원가와 가격을 높이는 결과를 가져왔다.

그러나 韓國의 製造業界는 그동안 商品의 原價節減에 있어 物的流通費用을 간과한채 주로 生産原價節減에만 힘을 기울여 왔으며, 그 結果 수송내지는 유통의 非效率性이 商品原價에 반영되어 國際競爭力의 약화와 동시에 화물운송업계의 침체와 踏步를 초래하는 주요 原因 중의 하나가 되었다.<sup>1)</sup> 이러한 非效率的인 輸送體制은 또한 國土空間의 효율적 이용을 억제하여 國家經濟發展을 阻害하는 주요 원인이 될 수 있다. 따라서 보다 效率的이고 合理的인 화물운송체계의 確立은 생산자의 측면에서 뿐만 아니라 消費者와 國家的 측면에서도 시급히 요청되는 문제이다. 이러한 合理的이고 效率的인 貨物運送體制을 확립하기 위해서는 우선, 현재의 화물운송체계를 評價하고, 長期的이고 綜合的인 관점에서 그 交通下部構造를 개선할 수 있는 効果적인 投資計劃을 세우는데 利用될 수 있는 理論的인 모델의 제시가 요구된다.

### 1. 研究目的

본 연구의 목적은 貨物輸送體制의 개선을 위해 보다 合理的이고 效果的인 投資計劃을 세우는데 이용될 수 있는 理論的인 모델을 정립하는 것이다. 보다 實際에 가깝고 精確한 貨物

輸送體制의 모델을 정립하기 위해서는 화물운송에 관련되는 모든 要素들을 包含시킨 모델의 定立이 필요하다. 그러나 計算의 어려움과 解答을 찾는 데 所要되는 費用問題 등으로 하여 이제까지는 極度로 單純化된 화물수송체계에 대한 모델들이 정립되어 왔다. 本 研究에서는 이러한 單純化된 貨物輸送體制의 모델들의 非現實的이고 不正確한 短點을 극복하기 보다 實際에 가깝고 正確한 화물수송체계의 모델을 定立하기 위해 貨物輸送에 關聯될 수 있는 대부분의 要素들을 結合시켰으며, 또 各 요소들에 나타나는 時間的 變化와 그들 사이에 存在할 수 있는 動的相互關係(Dynamic Interrelationship)을 考慮할 수 있도록 모델을 정립하였다. 특히 各 商品의 需要나 供給의 時間的 空間的 變化와 교통비의 변화는 地域間的 費用關係式을 變化시킬 수 있으므로 이런 要素들의 변화는 貨物輸送體制을 위한 投資計劃에 決定的인 影響을 미칠 수 있다. 따라서 本 研究에서는 各 商品의 需要와 供給의 時間的·空間的 變化, 各 商品의 輸送에 利用되는 各 시설물의 使用料와 收容能力의 時間적 變化, 그리고 各 商品의 수송을 위한 交通費와 交通網의 時間的·構造的 變化 등을 考慮하였다.

貨物輸送體制을 改善하기 위한 方法은 크게 두가지로 구분될 수 있다. 첫째, 貨物輸送에 利用되는 各 施設物들을 주어진 交通網 상에 적절히 配置하는 것이다. 貨物輸送에 利用되는 시설물로는 船·荷積施設(Loading Unloading Facilities), 貯藏倉庫施設(Storage Facilities), 혹은 綜合터미널(Terminal Complex) 등을 들 수 있을 것이다. 따라서 그들을 設置할 位置와 規模, 그리고 活動程度(Activity Level) 등을 結成하는 것이 要求된다. 둘째로, 交通網의 構造 自體를 개선하여 地域間的 交通비를 減少시키거나 交通路의 수송능력을 增加시키고, 경우에 따라서는 各 商品의 새로운 需要地域이나 供給地域을 既存의 貨物輸送體制에 연결시킴으로써 화물의 流通을 원활히 하고 商品供給의 柔軟性(Reliabi-

lity)를 높이도록 하는 것이다. 따라서 새로 建設하거나 改善할 交通로의 위치와 그 규모를 결정하는 문제가 남게 된다. 그러나 이 두 가지 改善方案은 자기 獨立인 것이 아니고 서로 相互 密接한 영향을 주므로 그 각각의 決定은 그들 사이에 存在할 수 있는 동적인 相互 聯關性을 考慮할 수 있도록 하나의 統合된 상품수송체계의 모델에서 同時의이고 一貫性 있게 決定되어야 한다. 그러나 이제까지 대부분의 研究에서 이 問題들은 각각 獨立인 것으로 다루어져 왔다. 즉 施設物의 立地·再立地 問題나 상품의 공급문제에서 모두 고정된 交通網을 기본적으로 가정하고 있으므로 주어진 交通망 상에서 施設物의 최적 위치와 규모, 活動程度 등을 결정하거나 商品의 最適流通패턴(Optimal Commodity Flow Pattern)을 찾는 것이 目的이었다. 마찬가지로 交通開發問題에서는 그 交通망 상에 위치하고 있거나 새로 設置될 施設物이나 각 상품의 需要·供給의 공간적 분포에 나타날 변화 등을 간과한 채 주어진 수요와 공급의 構造속에서 상품의 輸送을 원활히 하기 위해 요구되는 道路網의 개선을 위해 새로 新設하거나 改善할 交通로의 最適位置와 그 規模, 혹은 그 投資 스케줄을 찾는 것이 주요 目的이었다. 그러나 實際의 貨物輸送體系에서 이들은 각각 독립적인 것이 아니고 서로 밀접한 연관이 있으며, 각 要素들에 時間的·空間的 變化가 있을 수 있으므로 그들 사이에 存在하는 相互依存關係를 고려하여 각각의 결정을 내리는 것이 보다 合理的이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 시설물의 立地·再立地問題, 상품의 유통문제, 그리고 交通망개발문제 등을 결합하여 하나의 貨物輸送體系를 위한 모델을 정립하여 장기적이고 종합적인 견지에서 가장 合理的이고 효율적인 貨物輸送體系를 확립할 수 있는 最適의 改善方案과 投資方案을 제시하려는 것이 主要目的이다.

특히 貨物輸送體系의 개선을 위한 투자는 지역의 상황에 따라 여러가지 複合的이고 혹은 서로 相衡되는 目的들이 存在한다. 따라서 각

지역의 특수한 상황에 알맞는 投資計劃을 제시하기 위해서는 이들 서로 相衡的이고 複合的인 目的들을 적절히 만족시킬 수 있는 투자 계획을 세우는 것이 要求된다.

## 2. 研究方法

화물수송체계는 여러가지 複合的인 變數들의 영향을 받으며, 또 그 변수들이 서로 密接한 關係가 있으므로 각 變數들의 解答은 그들간의 相互 動的인 關係를 考慮하여 決定되어야 한다. 數學的計劃(Mathematical Programming) 方法은 이처럼 각 변수들이 서로 相互依存關係에 있는 경우에 그들간의 상호의존 關係를 고려한 包括的이고 體系的인 Overview를 提供할 수 있으므로 이러한 문제에 가장 適合한 研究方法이라 할 수 있다.

특히 多目的計劃(Multiobjective Programming) 方法은 서로 상충되는 計劃目的들(Planning Objectives) 사이에 Trade-offs를 提供할 뿐만 아니라 각 상황에 알맞는 投資計劃의 代案을 제시할 수 있다는 利點이 있으므로 화물수송체계의 투자를 위한 계획(Planning) 처럼 그 目的이 複合的인 경우에 특히 유리한 方法이라 할 수 있다.

이러한 數學的計劃(Mathematical Programming) 方法을 적용하려면 우선 화물수송에 관련있는 모든 現象은 點(Node)과 線(Arc)으로 抽象化된 Network 構造로 표현되어야 한다. 따라서 각 상품의 需要地, 供給地, 그리고 각 交通로의 結節地 등은 點(Node)으로 표현되고, 이 점들을 연결시켜주는 交通路(즉, 高速道路, 鐵路, 水路 등)들은 線(Arc)로 표현된다.

이러한 Network 構造에서 數學的計劃(Mathematical Programming) 方法을 이용한 화물수송의 문제는 1941年 Hitchcock<sup>2)</sup>에 의해 소개된 交通問題(Transportation Problem)에서 시작되어 현재는 거의 모든 商品流通問題와 시설물의 立地·再立地問題, 그리고 交通망개발문제에서 이용되고 있는 研究方法이

다. 또한 1961年 Balinski<sup>3)</sup>의 Warehouse 입지문제에서 定數計劃(Integer Programming) 方法이 소개된 이후 시설물의 立地·再立地決定을 위한 方法으로 이 定數計劃(Integer Programming) 方法이 이용되어 왔다.

本論文에서는 각 交通路上의 貨物의 流通을 결정하기 위한 非定數變數(Non-Integer Variable)과, 貨物수송에 관련된 시설물의 입지결정과 道路의 改善를 위한 意思決定을 위한 定數變數(Integer Variable)을 혼합한 混合定數計劃(Mixed Integer Programming) 方法이 적용되었다.

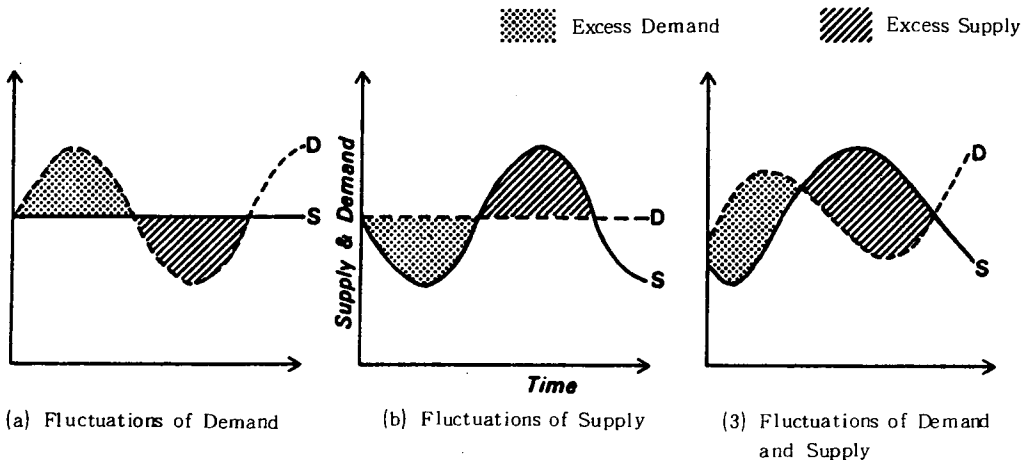
## II. 本 論

### 1. 理論的 背景

일반적으로 貨物輸送問題는 각 貨物을 그들

의 供給地에서 需要地까지 수송하기 위한 最小費用의 수송 Pattern을 찾는 것이 目的이다. 따라서 각 貨物의 需要와 供給의 空間적 분포, 각 貨物 수송을 위한 각 交通路의 運賃과 그 空間的 構造, 그리고 貨物 수송에 이용되는 각 시설물의 空間적 분포와 그들의 收容能力과 經費 등은 그 商品輸送 Pattern을 결정하는 主要因자들이 될 수 있다. 실제의 貨物수송에 있어서 많은 경우에 이 主要因자들이 고정되어 있지 않고 變化하므로 장기적 견지에서 最適의 貨物수송패턴을 찾기 위해서는 이러한 時間的 變化要素를 고려하여 모델을 정립하여야 할 것이다.

그림 1(a)-(c)는 時間의 變化에 따라 나타날 수 있는 貨物의 수요와 供給의 상태를 보여주는 것이다.



(그림 1) Seasonal Fluctuations of Demand and Supply

즉 그림 1(a)는 貨物의 供給은 一定한데 반하여 수요의 季節的인 變化를 보이는 경우이다. 그 대표적인 예로는 冷·暖房에 이용되는 에너지資源의 수요·供給패턴을 들 수 있다. 그림 1(b)는 이와 相反되는 경우도 貨物의 需要는 一定한데 반하여 그 供給이 季節적인 變化를 보이는 경우이다. 우리의 食生活에서 주

식으로 이용되는 穀物들의 수요와 供給패턴이 그 代表的인 例이다. 그밖에도 그림 1(c)에서 볼 수 있는 것처럼 그 貨物의 需要와 供給 모두가 각기 다른 季節的 變動을 보이는 경우도 있을 것이다.

이처럼 貨物의 수요나 供給에 季節적인 變動이 있는 경우에는 貨物의 供給可能性(Su-

ply Reliability)를 높여주고 교통로의 季節的 混雜問題들을 피할 수 있도록 保管倉庫施設(Storage Facility)를 交通網上에 적절히 배치하면 보다 효율적인 상품유통체계를 확립할 수 있을 것이다.

즉 保管倉庫施設을 적절한 위치에 설치하면 공급이 超過하는 시기의 상품을 그 保管倉庫에 저장하여 두었다가 需要가 많은 시기에 供給함으로써 상품의 時間的 再分配를 가능하게 하며, 價格의 暴落이나 昂勝을 피할 수 있고 어느 한 時期에 集中的으로 상품의 流通을 막을 수 있으므로 교통로의 混雜問題도 抑制할 수 있으므로 全體의 인 비용의 손실을 줄일 수 있다.

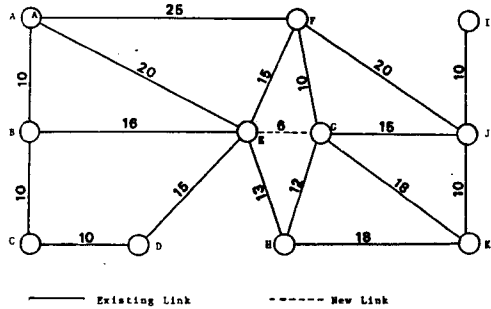
保管倉庫施設의 立地問題를 위한 數學的計劃(Mathematical Programming) 모델은 1)수 자원관리문제와 연관된 댐(Dam)의 最適位置와 그 規模를 決定하는 問題(ReVell et al. 1969<sup>4)</sup>; 1970<sup>5)</sup>; 1975<sup>6)</sup>; Loucks 1970<sup>7)</sup>; Eastman과 ReVelle 1973<sup>8)</sup>; Gunderach와 ReVelle 1975<sup>9)</sup>, 2) 電氣發展에 관련된 발전 시설과 그 전기의 수송, 그리고 전기의 保管施設立地問題(Bae와 Devine 1978<sup>10)</sup>; Reinert 1982<sup>11)</sup>, 그리고 3) 穀物輸送에 관련된 穀物倉庫의 立地問題(Hilger et al. 1977<sup>12)</sup>; Barnett et al. 1982<sup>13)</sup>) 등에서 개발되어 왔다.

즉 주어진 수제망이나 전성망, 혹은 道路網上에서 자기의 計劃目的(Planning Objective)과 그 運營上의 條件式(Operating Constraints)들을 만족시키기 위한 댐이나 電氣充電施設, 穀物貯藏倉庫施設 등의 最適입지나 그 規模를 결정하는 것이 이러한 문제들의 主要目的이 되어 왔다.

그러나 본 연구에서는 交通網을 고정되어 있는 것으로 보지 않고 새로운 도로의 建設이나 既存道路의 개선으로 그 구조에 변화를 認定하였으므로 地域間 상품수송비나 상품의 수요·공급의 空間的 分布가 달라질 수 있으므로 지역간 費用關係式이 變化할 수 있을 것이다. 따라서 각 시설물의 最適立地, 規模, 그 活動

程度 등이 달라질 수 있을 것이다.

그림 2의 모형 道路網上의 두점 E와 G를 연결하는 새로운 도로가 添加되었을 경우, 이 새로운 道路 EG를 각 지점간의 最端經路(Shortest Path)에 包含시켜 그 最단경로가 減少함을 알 수 있다.



(그림 2) Impact of New Link Additions

<表 1> Shortest Paths between Nodes

Nodes	With link E-G	Without link E-G
A-G	26	35
A-I	51	55
A-J	41	45
A-K	44	55
B-G	22	41
B-I	47	61
B-J	37	51
B-K	40	49
C-G	31	50
C-I	56	70
C-J	46	65
C-K	49	56
D-G	21	40
D-I	46	70
D-J	36	55
D-K	39	46
E-G	6	25
E-I	31	55
E-J	21	40
E-K	24	31

<表1>은 이 새로운 道路 EG를 包含시켰을 경우 그 最端經路(Shortest Path)가 감소하는 각 점들의 쌍을 보인 것이다.

(그림 2)와 <表1>에서 보는 바와같이 交通網의 構造에 어느 한 部分에 變化가 생길지라도 그 영향은 交通망 거의 전체에 나타남을 알 수 있다.

특히 새로운 道路의 建設로 상품의 새로운 供給地나 需要地가 기존의 상품 수송체계에 연결되어 각 시기에 존재할 수 있는 剩餘供給(Excess Supply)를 흡수하거나 剩餘需要(Excess Demand)를 충족시킬 경우 상품의 保管倉庫와 같은 역할을 담당할 수 있을 것이다.

따라서 보관창고시설과 交通망의 構造變化는 상품공급의 柔軟性 增加와 도로의 혼잡성 감소, 상품운송비의 감소라는 점에서 서로 競合關係에 놓여 있다. 한편 商品保管倉庫施設物의 설치나 交通로의 신설과 개선은 모두 각각 그에 상응하는 投資費用을 요구하므로 가장 효율적이고 합리적인 貨物輸送體系를 확립하기 위한 投資計劃을 세우는데 이용하기 위해서는 그 각각의 문제가 하나의 모델체제에서 결정되어야 할 것이다. 이러한 모델을 정립하기 위해 본 연구에서는 Ratick et al.(1986<sup>14</sup>)에 의해 開發된 Intertemporal Network Storage Location Allocation (INSLA) 모델에 交通로 新設問題를 結合시켰다. Intertemporal Network Storage Location Allocation 모델은 상품의 需要와 供給이 季節性을 나타내는 경우에 보관창고시설을 이용하여 상품의 時間的 再分配를 가능하게하여 보다 효율적인 상품의 輸送體系를 確立하도록 하였다. 특히 다수의 상품을 수송하는 문제를 다루었으며 倉庫施設物의 규모에 변화를 주어 規模經濟(Economies of Scale)의 效果도 考慮하였다.

교통망개발문제에 數學的計劃(Mathematical Programming) 方法을 導入한 研究는 1961年 Charnes와 Cooper<sup>15</sup>)에 의해 소개되었으며, 특히 새로운 道路를 기존의 道路網에 첨가시키는 문제는 Roberts와 Funk(1964)<sup>16</sup>)

에 의해 소개되어 Roberts(1971)<sup>17</sup>)와 Barber(1977<sup>18</sup>), 1978<sup>19</sup>)에 의해 構體化되었다.

## 2. Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델

본 논문에서는 貨物輸送에 관련된 여러 變數들의 時間的 變化性과 그들 사이의 動的相互關係를 고려하기 위한 모델을 정립하기 위해, 기존의 시설물 立地·再立地問題에 保管倉庫施設의 입지문제와 交通로 新設問題를 결합시켰다. 특히 상품의 수요와 공급의 季節的 變化를 고려하였으며 交通網의 구조적 변화를 가정하였다. 貨物輸送에 이용되는 각종 시설물들과 交通망은 여러 상품의 수송에 이용될 수 있으며 經費의 節約 등의 효과가 있으므로 多數의 商品(Multi Commodity) 輸送問題를 위한 商品輸送體系의 모델을 정립하였다.

보다 經濟的이고 效率的인 상품수송패턴을 얻기 위하여 여기에 소개된 Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델은 總費用最小化의 目的函數(Objective Function)(I)와 그를 위한 몇가지 運營상의 條件式(Constraints)을 갖는다.

$$(I) \text{ minimize } g(X, X, W) = \sum_{j \in N} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} (c_{ijqt}^v x_{ijqt}^v + \bar{c}_{ijqt}^v \bar{x}_{ijqt}^v) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} P_{ijqt} (x_{ijqt}^v + \bar{x}_{ijqt}^v) + \sum_{i \in N} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} O_{itv} (x_{ijqt}^v + \bar{x}_{ijqt}^v) + \sum_{j \in N} \sum_{r \in R} F_r W_{rj} + \sum_{ij \in L} \sum_{v \in V} F_v d_{ij} W_{vij}$$

$X_{vijt}$  = amount of commodity q shipped from node i to node j by transportation mode v at the time period t

$\bar{X}_{vijt}$  = amount of commodity q shipped from node i to node j through new transportation link at the time period t

$W_{rj}$  = 1 if facility r is open at node j  
0 otherwise

$W_{vij}$  = 1 if transportation link for mode v builds between node i and j  
0 otherwise

i = index of all origins

j = index of all destinations

- q = index of all commodity types
- r = index of all facility types
- v = index of all transportation modes
- t = index of all time periods
- $L_A$  = set of all potential locations of new transportation link addition .
- $N_V$  = set of all supply node
- $N_H$  = set of all nodes at which handling facilities may be
- $C_{vjqt}$  = transportation cost of shipping a unit of commodity q from node i to node j at time period t.
- $\bar{C}_{vjqt}$  = new transportation cost of shipping a unit of commodity q from node j at time period t.
- $F_r$  = fixed investment cost for facility r
- $F_v$  = average cost per mile for building a new transportation route v
- $O_r$  = operating cost of handling facility r
- $P_{iqt}$  = price per unit of commodity q at node i at time period t
- $\alpha_j$  = scaling parameter for the fixed cost at node j
- $\beta_{ij}$  = scaling factor for the geographical difficulty

總費用最小化的 목적함수는 다음의 비용들을 포함한다.

첫째, 각 상품을 生産地로부터 需要地까지 供給하기 위해 소요되는 總交通費, 둘째, 각 상품을 그 供給地에서 구매하기 위해 所要되는 總商品 購買費, 셋째, 각 상품을 수송하는 과정에서 이용해야 하는 각 施設物의 사용에 소요되는 總施設物使用料, 그리고 네째로, 각 시설물의 설치와 交通路의 新設을 위해 要求되는 總投資費를 포함한다. 각 시설물의 설치나 交通路의 新設에 요구되는 投資費用은 그 地理的 位置와 與件의 影響을 받는다.

즉, 그 지역의 地價와 노동비 등의 都市的 요소와 地形의인 어려움 등 自然的 요소에 따라 비용에 차이가 있을 것이다. 본 論文에서는 이러한 地理的 與件을 考慮하기 위해 施設物의 투자비용과 道路建設의 투자비용에 地理的 乘數(Geographical Multiplier)  $\alpha_j$  와  $\beta_j$  를 각각 사용하였다. 그외에도 Ratick et al. (1986)의 Intertemporal Network Storage Location Allocation 모델에서와 같이 施設物과 新設될 道路의 規模에 變化를 주어

規模經濟(Economies of Scale)의 효과도 고려하였다. 이 總費用最小化의 目的函數를 만족시키기 위한 運營상의 조건식들 (2)-(10) 은 다음과 같다.

subject to the conditions

$$(1) \sum_i \sum_v (x_{ijqt}^v + \bar{x}_{ijqt}^v) - D_{jqt} \quad \forall j \in \bar{N}_D, q, t=1,2,\dots,T$$

$$(2) \sum_j \sum_v (x_{ijqt}^v + \bar{x}_{ijqt}^v) \leq M_{iqt} \quad \forall i \in \bar{N}_V, q, t=1,2,\dots,T$$

$$(3) \sum_i \sum_v (x_{ijqt}^v + \bar{x}_{ijqt}^v) - \sum_k \sum_v (x_{jkqt}^v + \bar{x}_{jkqt}^v) \quad \forall j \in \bar{N}_T, q, t=1,2,\dots,T$$

$$(4) \sum_i \sum_q \sum_v (x_{ijqt}^v + \bar{x}_{ijqt}^v) \leq H_r \quad \forall j \in \bar{N}_H, r, t=1,2,\dots,T$$

$$(5) s_{jqt} - s_{jqt-1} + \left( \sum_i \sum_v x_{ijqt}^v - \sum_k \sum_v x_{jkqt}^v \right) + \left( \sum_i \sum_v \bar{x}_{ijqt}^v - \sum_k \sum_v \bar{x}_{jkqt}^v \right) \quad \forall j \in \bar{N}_S, q, t=1,2,\dots,T$$

$$(6) \sum_q x_{ijqt}^v \leq U_v \quad \forall ij \in L_A, v, t=1,2,\dots,T$$

$$(7) \sum_q s_{jqt} \leq B_j \quad \forall j \in \bar{N}_S, t=1,2,\dots,T$$

$$(8) w_{rj} \in (0, 1) \quad \forall j \in \bar{N}_H, r$$

$$(9) w_{vij} \in (0, 1) \quad \forall ij \in L_A, v, t=1,2,\dots,T$$

$E_{vij}$  = total benefit from the new link v between nodes i and j

$N_D$  = set of all demand node

T = number of time periods

$D_{jqt}$  = demand for commodity q at node j at time period t

$M_{iqt}$  = production capacity of commodity q at node i at time period t

$N_T$  = set of all transshipment node

$H_r$  = handling capacity of facility r

$S_{jqt}$  = amount of commodity q stored at node j at the end of time period t

$S_{jqt-1}$  = amount of commodity q stored at node j at the end of period t-1

$N_S$  = set of all potential sites of storage facility

$U_v$  = upper limit of the shipping capacity of transportation link v

$B_j$  = storing capacity of storage facility located at node j

첫째, 각 상품의 需要地에서의 수요가 만족 되어야 한다. 즉 각 상품의 수요지로 流入되는 상품들의 각각의 합은 그 상품에 대한 需要와 一致하여야 한다(1), 둘째, 각 상품의 供給地의 공급능력에 대한 條件式이다. 즉, 각 상품의 供給地에서 각 지역으로 流出되는 商品의 流出量의 합은 그 生産限界能力을 超過할 수 없다(2), 셋째, 단순히 상품의 輸送手段이 바뀌는 節이지점(Trans Shipment Node)에서는 각 상품의 物量均衡(Material Balance)이 요구된다. 즉 각 節이지점(Transshipment Node)에 流入되는 각 상품의 합과 그 節지에서 流出되는 각 상품의 합은 同一하여야 한다(3). 넷째, 貨物輸送에 이용되는 각 시설물의 화물처리능력에 관한 條件식이 요구된다.

따라서 각 시설물이 立地한 節지로 流入되는 모든 상품의 합이 그 시설물의 限界能力을 超過할 수 없다(4), 다섯째, 保管倉庫施設은 시간적인 연속성을 가지므로 각 保管창고 시설에 貯藏되어 있는 상품의 양에 대한 時間的 物量均衡(Intertemporal Material Balance)를 나타내는 條件식이 요구된다. 즉 어느 한 時期의 末에 그 保管창고시설에 남아 있는 각 상품의 貯藏量은 그 이전 시기에 그 保管倉庫施設에 남아 있던 商品의 量에 그 시기동안 純粹하게 流入된 상품의 양을 合한 것과 같아야 한다(5). 條件式 (6)과 (7)은 새로 新設될 도로와 保管창고시설의 화물유통한계와 保管能力限界에 관한 關係式이다. 즉 新設될 各 道路를 이용해서 운반되는 각 시기의 상품의 總합은 그 도로의 流通限界를 超過할 수 없음을 나타내며, 같은 脈絡으로 保管창고시설의 收容能力的 限界를 가정하면 어느 한 시기에 各 창고시설에 保管되어 있는 상품의 합은 그 最大收容能力을 超過할 수 있다.

그외에도 각 시설물의 설치에 소요되는 投資費와 新設되는 交通路의 建設에 소요되는 투자비가 總費用最小化의 目的函數에 올바르게 포함되도록 제어하는 定數의 條件式(Integer Constraints)가 요구된다. 條件式 (8)과 (9)

은 각각 시설물과 도로의 建設을 결정할 때 定數單位로 완전히 하나를 결정하든지 그렇지 않으면 전혀 建設하지 않도록 함으로써 各 施設物이나 道路의 부분적 설치를 용납치 않는 關係式이다.

여기에 소개된 總費用最小化의 目的函數와 條件式 (1)~(9)이 모두 만족된다면 가장 효율적이고 경제적인 貨物輸送體系를 제시할 수 있을 것이다. 이 모델에서 요구하는 모든 情報가 적절히 提供되면 다음의 解答이 동시에 決定된다.

- 1) 각 시설물의 最適 立地와 그 規模, 그리고 最適의 活動程度(Activity Level),
- 2) 新設될 交通路의 最適 位置와 그 規模, 그리고 그 交通로로 運搬된 貨物의 最適 流通量,
- 3) 각 상품의 需要地와 供給地의 最適 選擇,
- 4) 각 交通路의 最適 商品運送量

### 3. Multiobjective Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델

앞의 모델에서 다른 交通路의 新設문제는 單純히 貨物輸送을 원활히 하는 機能外에 지역 經濟·社會·文化 전반에 걸친 복합적인 影響力을 가진다.

즉 하나의 道路가 新設되면 貨物流通 뿐만 아니라 地域間 사람의 왕래도 잦아질 수 있으며 새로운 技術이나 文化 등의 情報도 빨리 傳播되어 지역의 經濟的 機會를 높이고 社會·文化의 발전을 가져올 수 있다. 따라서 交通路의 開發을 위한 投資는 다른 시설물에의 투자와는 달리 取扱되어야 한다. 특히 制限된 投資資產(Investment Capital)을 갖고 있는 대부분의 開發途上國들의 경우에는 효율적인 貨物輸送體系의 확립을 위한 投資에서 될 수 있으면 단편적으로 이용되는 각종 시설물에의 投資보다는 交通로 開發을 장려하여 지역 經濟成長에 最大效果를 추구하려 할 것이다. 이



처럼 서로 상충하는 計劃目的(Planning Objective)이 존재하는 상황에서는 多目的計劃(Multiobjective Programming) 方法을 導入하면 그 相衡하는 계획목적들 사이의 Trade-offs 을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 投資計劃의 代案을 얻을 수 있으므로 여기서는 앞에서 소개한 Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델을 多目的 Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델로 擴張하였다.

따라서 總費用最小化의 目的函數外에 교통로 신설에의 投資에서 類推될 수 있는 利益(Benefit)을 최대로 하는 目的函數(III)을 포함시켰다. 교통망의 개발이 지역경제에 미치는 영향에 대해서는 많은 地域經濟學者들에 의해 研究되어 왔다.

그러나 교통망 개발을 위한 投資가 地域經濟에 미치는 影響은 아직 명확히 定義되지 못하였으며 그 영향을 測定하는 方法도 아직 많은 討論의 여지가 있다. 본 연구에서는 교통로의 신설에 투자된 費用에서 類推되는 利益(Induced Benefit)을 측정하기 위한 方法으로 一般적으로 많이 利用되는 費用-利益分析(Cost-Benefit Analysis) 方法을 적용하였다. 특히 Vander Tak와 Ray (1971)<sup>20)</sup>에 의해 소개된 社會的 剩餘(Social Surplus)의 概念을 導入하였다.

교통로의 신설이 定數單位로 決定되는 속성 때문에 각 도로의 신설에 따라 유추되는 이익도 쉽게 數學的 計劃모델에 結合시킬 수 있다. 즉 각 도로의 신설에 의한 각 상품별 消費者剩餘(Consumer Surplus)와 生産者剩餘(Producer Surplus)가 결정되며 그 合에 각 교통로의 신설을 결정하는 定數變數(Integer Variable)을 결합시키면 된다. 다음의 관계식(II), (1)~(9)은 多目的 Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델을 나타내는 것이다. 즉 總費用最小化의 目的函數(1)과 다른 運營上的 條件式(1)~(9)은 Intertemporal Storage Location Trans-

portation Link Addition 모델과 同一하다.

$$(III) \text{ maximize } k(E, W) - \sum_{i,j \in L_A} \sum_v E_{vij} U_{vij}$$

$E_{vij}$  = total benefit from the new link  $v$  between nodes  $i$  and  $j$

subject to the conditions

$$(1) \sum_i \sum_v (X_{ijqt}^v + \bar{X}_{ijqt}^v) - D_{jqc} \quad \forall j \in \bar{N}_D, q, t=1,2,\dots,T$$

$$(2) \sum_j \sum_v (X_{ijqt}^v + \bar{X}_{ijqt}^v) \leq H_{iqc} \quad \forall i \in \bar{N}_V, q, t=1,2,\dots,T$$

$$(3) \sum_i \sum_v (X_{ijqt}^v + \bar{X}_{ijqt}^v) - \sum_k \sum_v (X_{jkqt}^k + \bar{X}_{jkqt}^k)$$

$\forall j \in \bar{N}_T, q, t=1,2,\dots,T$

$$(4) \sum_i \sum_q \sum_v (X_{ijqt}^v + \bar{X}_{ijqt}^v) \leq H_r U_{rj} \quad \forall j \in \bar{N}_H, r, t=1,2,\dots,T$$

$$(5) S_{jqc} - S_{jqc-1} + (\sum_i \sum_v X_{ijqt}^v - \sum_k \sum_v X_{jkqt}^k)$$

$$+ (\sum_i \sum_v \bar{X}_{ijqt}^v - \sum_k \sum_v \bar{X}_{jkqt}^v) \quad \forall j \in \bar{N}_S, q, t=1,2,\dots,T$$

$$(6) \sum_q X_{ijqt}^v \leq U_v U_{vij} \quad \forall ij \in L_A, v, t=1,2,\dots,T$$

$$(7) \sum_q S_{jqc} \leq B_j U_j \quad \forall j \in \bar{N}_S, t=1,2,\dots,T$$

$$(8) U_{rj} \in (0, 1) \quad \forall j \in \bar{N}_H, r$$

$$(9) U_{vij} \in (0, 1) \quad \forall ij \in L_A, v, t=1,2,\dots,T$$

$N_D$  = set of all demand node

$T$  = number of time periods

$D_{jqc}$  = demand for commodity  $q$  at node  $j$  at time period  $t$

$M_{iqc}$  = production capacity of commodity  $q$  at node  $i$  at time period  $t$

$N_T$  = set of all transshipment node

$H_r$  = handling capacity of facility  $r$

$S_{jqc}$  = amount of commodity  $q$  stored at node  $j$  at the end of time period  $t$

$S_{jqc-1}$  = amount of commodity  $q$  stored at node  $j$  at the end of period  $t-1$

$N_S$  = set of all potential sites of storage facility

$U_v$  = upper limit of the shipping capacity of transportation link  $v$

$B_j$  = storing capacity of storage facility located at node  $j$

이러한 多目的計劃 모델을 풀기 위한 方法으로는 目的函數中の 하나를 條件式으로 바꾸

어 단일 목적함수의 문제로 만들어 解答을 구하는 방법과 두개의 目的函數에 각각 무게 (Weight)을 주어 하나의 목적함수로 結合시켜 그 解答을 구하는 方法이 있다.<sup>21)</sup>

이러한 多目的 Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델은 또한 주어진 상품의 需要를 전부 만족시킬 수 있는 貨物輸送體系를 확립하는 것이 不可能할 정도로 투자자금이 부족한 計劃狀況 (Planning Situation)에서 가장 효율적인 貨物輸送體系를 확립하기 위한 投資計劃을 세우기 위한 문제로도 확장이 가능하다. 그 한 方法으로 상품의 需要를 모두 만족시켜야 한다는 첫번째 조건식을 緩和시켜 需要의 일부는 만족되지 못할 수도 있는 경우를 인정하여 투자비용의 감소를 유추하는 것이다. 따라서 이 첫번째 需要의 條件式을 變化시켜 目的函數로 바꾸는 것이다. 즉 總費用最小化의 목적함수와 함께 불만족된 수요의 최소화 목적함수를 結合시키는 것이다(이금숙, 1986)<sup>22)</sup> 즉 자기 다른 level의 不滿足需要에서 가장 효율적인 화물수송체계의 투자대안을 제공함으로써 각 狀態에서 요구하는 總投資費를 算出할 수 있으며, 그들간의 Trade-offs를 제공할 수 있다. 實際 資料를 이용한 이 모델의 적용의 結果는 이금숙(1986)<sup>22)</sup>에 分析되어 있다.

#### 4. 모델의 適用과 要求되는 資料

앞에서 소개한 Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델과 多目的 Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델은 거의 모든 貨物輸送問題에 適用할 수 있다. 뿐만 아니라 그 모델들의 係數나 變數에 약간의 수정을 가함으로써 어떤 종류의 시설물의 立地·再立地問題나 既存 施設物의 廢棄(Closing) 問題에도 적용이 可能하다.

그러나 이러한 數學的 計劃모델들이 얼마나 정확하고 실제에 가까운 解答을 提供할 수 있는냐 하는 問題는 數學的으로 얼마나 정확하

고 합리적인 공식이 세웠느냐 하는 문제와 얼마나 正確하고 適當한 資料들을 利用하였느냐에 크게 좌우된다. 즉 이러한 數學的 모델의 적용을 위해서는 複雜하고 정교한 수학적 공식들을 解決할 충분히 발달된 컴퓨터技術과 資料蒐集의 용이함이 問題가 될 것이다. 이 모델들의 適用을 위해서는 最小한 다음의 資料들이 제공되어야 한다.

##### 1) 供給面

(a) 生産地의 位置, (b) 각 생산품의 生産限界能力, (c) 각 생산품의 產地價格

##### 2) 需要面

(a) 需要地의 位置, (b) 각 상품에 대한 需要量

##### 3) 交通網

(a) 각 輸送手段別 교통망, (b) 각 교통망에서의 輸送費(혹은 距離, 時間 등), (c) 각 輸送路의 輸送能力, (d) 新設될 道路의 單位距離當 道路建設費

##### 4) 施設物

(a) 각 시설물의 建設費, (b) 각 시설물의 運營費(Operating Cost), (c) 각 시설물의 處理·收容限界能力

이러한 資料外에도 Network 構造上에서 시설물의 입지·재입지 문제나 화물수송문제 등에 數學的 計劃모델을 適用하기 위해서는 모델의 分析에 앞서 Network 상에 있는 모든 점(Node)들 사이의 最短經路(Shortest Paths)가 결정되어야 한다. 특히 본 연구에서처럼 Network의 構造가 고정되어 있지 않고 새로운 道路의 신설과 함께 變化될 수 있는 경우에는 이런 動的인 Network 構造에서 新設되는 도로의 位置와 規模에 따라 자기 변할 각 점들간의 최단경로를 결정할 수 있는 動的 最短經路 Algorithm이 要求된다.

### Ⅲ. 結 論

본 연구는 보다 合理的이고 效率的인 貨物 수송체계를 확립하기 위한 보다 効果적인 投資計劃을 세우기 위해 貨物輸送過程에 관련있는 각종 변수와 그들의 시간적 變化성과 那些 사이의 動的 相互關係를 考慮한 數學的 計劃 모델을 正립하였다. 이 數學적 計劃 모델들은 1) 현재의 貨物輸送體系를 評價하고, 2) 그 交通下部構造를 改善하기 위한 가장 効果적인 투자계획을 세우는데 보다 正確하고 合理的인 情報를 提供할 수 있다.

交通網의 構造變化가 貨物수송에 이용되는 시설물의 立地나 規模, 그리고 貨物流通패턴에 미치는 影響을 감지하기 위해 시설물의 입지·재입지문제, 貨物유통문제, 그리고 交通路의 新設問題를 하나의 貨物輸送體系를 위한 數學的 計劃모델에 결합시켰다. 특히 상품의 需要와 供給의 時間的 變化와 그들의 시간적 再分配를 위한 보관창고시설의 立地問題를 다루었다. 또한 교통망의 改善을 위한 투자는 貨物수송에 이용되는 다른 시설물의 設置에의 투자와는 달리 地域의 經濟·社會·文化面에 미치는 影響이 크므로 여러가지 複合的인 計劃目的이 있을 수 있으므로 본 연구에서는 多目的 計劃方法을 適用하여 서로 相衡되는 투자목적들 사이에 적절한 절충과 투자의 代案들을 提供할 수 있는 모델을 正립하였다. 따라서 여기에 소개될 數學的 計劃모델들은 效率的인 貨物수송체계를 확립하기 위한 모든 경우에 適用이 可能하다. 특히 교통망의 改善에 의한 이익을 최대화하는 目的函數를 포함시킨 多目的 Intertemporal Storage Location Transportation Link Addition 모델은 投資資産의 부족문제 를 갖고 있는 대부분의 開發途上國에서 貨物輸送體系의 改善을 위한 투자계획을 세우는데 보다 有用할 것이다.

그러나 交通網의 改善으로 인한 地域經濟에 的 影響은 보다 명확하게 정의내려져야 하며 그 利益의 측정방법도 더 研究되어야 할 問題

이다. 즉 交通網의 改善은 本 논문에서 이용한 것 같은 社會的 剩餘 뿐만 아니라 個個人의 收入效果( Income Effect )가 있을 수 있으며 또 여러가지 經濟外的인 效果도 수반되므로 이런 全體的인 효과를 測定할 수 있는 方法의 강구가 요구된다. 이밖에도 상품의 需要와 供給 등 貨物輸送體系를 構成하는 變數들이 불확정한 要素를 포함할 수도 있으므로 이런 不確正性을 考慮할 수 있도록 Stochastic 數學計劃모델로의 확장이 필요할 것이다.

### REFERENCES

1. 交通開發研究院, 貨物輸送體制 改善에 관한 研究, 1986, p. 3.
2. Hitchcock, F. L., "The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities," *Journal of Mathematical Physics* 20, 1941, 224-230.
3. Balinski, M. L., "Integer Programming: Methods, Uses, Computation," *Management Science* 12, 1961, 253-313.
4. ReVelle, C., E. Joeres, and W. Kirby, "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design: 1, Development of the Stochastic Model," *Water Resources Research* 5, 1969, 767-777.
5. ReVelle, C. and W. Kirby, "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design: 2, Performance Optimization," *Water Resource Research* 6, 1970, 1033-1044.
6. ReVelle, C. and J. Gundelach, "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design: 4, A Rule that Minimizes Output Variance," *Water Resources Research* 11, 1975, 197-203.
7. Loucks, D.P., "Some Comments on Linear Decision Rules and Chances Constraints," *Water Resources Research* 6, 1970, 668-671.

8. Eastman, J. and C. ReVelle, "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design: Direct Capacity Determination and Intra-seasonal Constraints," *Water Resources Research* 9, 1973, 29-42.
9. Gundelch, J. and C. ReVelle, "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design, 5: A General Algorithm," *Water Resources Research* 11, 1975, 204-207.
10. Bae, H.M. and M. Devine, "Optimization Models for the Economic Design of Wind Power Systems," *Solar Energy* 20, 1978, 469-481.
11. Reinert, K., "Mathematical Programming Models for the Economic Design of Wind Energy Conversion Systems," Master Thesis, 1982, Boston University.
12. Hilger, D.A., B.A. McCarl, and W. Uhrig, "Facilities Location: The Case of Grain Subterminals," *American Journal of Agricultural Economics* 59, 1977, 674-682.
13. Barnett, D., J. Binkley, B. McCarl, R. Thompson, and J. Kennington, "The Effects of U.S. Port Capacity Constraints on National and World Grain Shipments," *Purdue University Agricultural Experiment Station Bulletin* 399, 1982.
14. Ratick, S. and J. Osleeb, M. Kuby, K. Lee, "Interperiod Network Storage Location Allocation (INSLA) Models," to appear in *Spatial Analysis and Location Allocation Models* (eds.) Rushton, J. and A. Ghosh, 1986, Van Nostrand.
15. Charnes, A. and W. Cooper, *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming* 1, 1961, John Wiley, New York.
16. Funk, M.L. and F.A. Tillman, "Optimal Construction Staging Using Dynamic Programming," American Society of Civil Engineers, *Journal of the Highway Division* 44, 1968, 255-265.
17. Roberts, P.O., "Selecting and Staging Additions to a Transport Network," *Techniques of Transport Planning: Pricing and Project Evaluation* 1, 1971, 251-275.
18. Barber, G.M., "Sequencing Highway Network Improvement: a Case Study of South Sulawesi," *Economic Geography* 53, 1977, 55-69.
19. Barber, G.M., "Regional Transport Investment Planning," *Annals of Association of American Geographers* 68, 1978, 384-396.
20. Van der Tak, H.G. and A. Ray, *Economic Benefits of Road Transport Projects*, World Bank Staff Occasional Papers, No. 13, 1971.
21. Cohon, J. L., "Multiobjective Programming and Planning," Academic Press, New York, 1978.
22. 李錦淑, Multiobjective Mathematical Programming Models of Intertemporal Multicommoding Distribution Problems, 1987 Ph.D. Thesis, Boston University.