

■ 論 文 ■

소화물 운송 서비스 네트워크 설계 모형 연구

A Service Network Design Model for Less-than-Truckload Freight Transportation

김 병 종

(한국항공대학교 항공교통학과 교수)

이 영 혁

(한국항공대학교 항공교통학과 교수)

목 차

- | | |
|--------------|------------------|
| I. 서론 | IV. 예제 |
| II. 문헌 조사 | 1. 입력 자료 |
| III. 모형 및 해법 | 2. 계산 과정 및 결과 해석 |
| 1. 예비 분석 | V. 결론 |
| 2. 모형의 정립 | 참고문헌 |
| 3. 해법 | |
-

요 약

소화물 일관 운송 과정에서 발생하는 직접비용을 최소화하는 수리 모형과 해법이 제안되었다. 고려되는 비용으로는 화물 운송을 위한 차량 운행에 필요한 제반 비용인 링크 비용과 터미널에서 일어나는 하차, 분류, 재적재 등 하역 작업에서 발생하는 노드 비용을 감안하였고 총비용을 줄이기 위한 화물의 운송 경로가 모형의 결정변수이다. 해법으로는 최종해의 품질은 다소 미흡하나 계산 시간이 짧은 Steepest Descent Method 와 최종해의 품질이 우수하나 계산 시간이 많이 소요되는 Simulated Annealing Method를 활용한 두개의 알고리즘이 고안되었다. 최적해를 찾아가기 위한 탐색의 출발점이 되는 초기해는 Dijkstra의 최단경로 알고리즘을 수정하여 찾는다. 예제를 통하여 알고리즘의 계산 과정을 설명하였고 제시된 두 방법의 최종해는 초기해에 비하여 비용 측면에서 각각 12%, 15%의 절감 효과가 있음을, 적재율 측면에서 초기해의 62.6%에서 각각 77.4%, 87.4% 향상됨을 확인하였다.

1. 서론

1994년 기준으로 한국의 연간 물류비가 47조 7억 원으로 GDP대비 15.7%에 이르고 이 중에서 수송 비용이 65%가 되는 상황에서 [권오경, 1997] 운송 전문 기업의 영업수지 개선 뿐만 아니라 제조업, 유통업등 여타 산업의 물류비 절감을 위한 수송비의 절감은 매우 중요한 과제이다. 수송비의 절감을 위해서는 도로, 항만, 철도, 공항 등 교통 관련 사회간접자본의 확충과 물류정보시스템과 같은 정보 인프라 확충이 무엇보다 중요하다. 그러나 이 같은 인프라 확충을 위한 노력은 긴 시간에 걸친 막대한 자금과 인력을 투자해야 결실이 가능하므로, 운영 방식의 개선을 통해 단기간에 수송비를 절감하는 방안도 동시에 추진되어야 한다. 운영 방식 개선에 의한 비용 절감은 다양하게 논의될 수 있으나, 본 연구에서는 "화물 운송에 있어서 어느 터미널과 터미널 간에 노선을 개설할 것인가? 또는 화물의 출발지와 목적지를 연결할 때 개설된 노선 중에서 어느 노선을 활용할 것인가?"라는 질문에 해답을 찾으려는 것이 중심 과제이다.

화물 운송은 운송 주체에 따라 화주가 자신의 차량으로 운송 필요를 충족시키는 자가 운송과 운송 전문 기업에 위탁하는 위탁 운송으로 구분되고, 화물의 양에 따라 트럭 단위 (TL: Truck Load) 화물 운송과 소화물 (LTL: Less-than Truck Load) 운송 본 고에서는 소화물 일관 운송이라 명명함—으로 구분된다.

대량 화물을 대상으로 하는 TL 운송은 요구 화물량이 차량 한대의 적재 능력을 초과하여 한 대 또는 그 이상의 차량을 동원하여 화물을 출발지에서 목적지까지 Non-Stop으로 운송함으로써 하나의 운송 요구를 충족시키는 활동을 가르킨다. 이 같은 TL 운송은 귀로시 역 방향의 화물을 확보할 있으나 여부가 운송 활동의 효율성을 결정하는 주된 요인 이므로, 차량의 현 위치를 파악하여 화물 운송 수요와 연결시켜주는 화물 운송 정보 시스템의 역할이 강조된다. 반면에 운송 요구 화물량이 차량 한 대의 적재량에 못 미치는 LTL 운송, 즉 소화물 일관 운송의 경우는 개별 운송 주문을 어디서 어떻게 집중하여 차량의 적재율을 여하히 높이는지가 운송 활동의 효율성을 제고하는 첩경이 되므로 실시간 화물 운송 정보 뿐만 아니라 화물 O/D를 감안한 사전 운송 계획이 매우 중요하다.

소화물 일관 운송은 공간적으로 넓게 분포되어 있는 지역 터미널과 화물 집중을 위한 중계 터미널로 구분되는 노드(Node)집합과 각 노드를 연결하는 링크(Link)집합으로 구성되는 네트워크에서 다양한 O/D별 운송 주문을 충족시키는 활동으로 정의할 수 있다. 이러한 운송 활동을 수행할 때 발생하는 비용으로는 화물을 노드에서 노드까지 운송하는데 드는 링크비용과 노드에서 하역, 분류, 적재에 드는 노드비용이 있으며, 이 비용은 결국 주어진 화물들을 목적지까지 어떤 경로로 어떤 경로로 운송할 것인가(Service Network Design Decision)에 따라서 결정된다. 그러나 이 두 비용간에는 trade-off관계가 있어 전체 비용을 최소화하는 운송 경로를 찾기가 쉽지 않다. 링크비용을 줄이기 위하여는 중계 터미널에서 가능한 화물을 많이 집중하여 장거리 운송 차량의 적재율을 높여야 하는데, 이때 집중된 화물의 하역-분류-적재를 위한 노드비용이 늘어나기 때문이다. 또한 논문이 다루는 네트워크 설계 문제는 설계 대안이 네트워크의 크기에 따라 기하급수적으로 늘어나기 때문에 운영자의 경험과 know-how만으로는 수 많은 설계 대안에 대한 평가에 한계가 있다. 현재 실무진에서는 과거의 네트워크 대안을 기준으로 국지적인 링크 변경을 통하여 운송 효율 개선을 꾀하고는 있는 정도이다.

본 연구는 소화물 일관 운송 활동에서 발생하는 링크비용과 노드비용의 합을 최소화하는 O/D별 화물 운송 경로 결정을 위해 수학적 모형을 정립하고 이에 대한 해법(Solution Algorithm)을 고안하는 것을 주 내용이다.

II. 문헌 조사

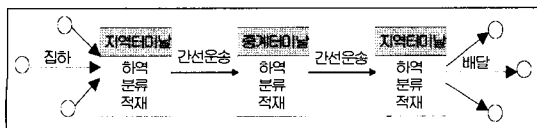
교통 및 운송과 관련하여 오래 전부터 많은 최적화 모형이 제안되었고 또 현재도 많은 연구가 진행되고 있으나, 특별히 소화물 일관 운송 과정을 대상으로 수행한 연구는 1980년대 이후에 본격화되었다. 이는 1980년 미국의 화물운송규제완화법(US DOT, 1980) 제정 이후 지속적으로 육상 화물 운송 산업에 대하여 규제 완화가 추진되어 기업간 경쟁이 강화된 것에 기인한다. 즉, 규제 완화에 따른 경쟁 환경하에서 운송 기업들이 보다 저렴한 가격과 보다 나은 서비스를 제공하기 위하여 최적화 기법을 이용한 운영비 절감에 심혈을 기울이게 되었던 것이다.

소화물 일관 운송 문제에 대하여 수리 모형에 의한 최적화를 다룬 최초의 논문은 Powell and Sheffi(1983)로 알려져 있다. 그들은 본 의 주제인 소화물 일관 운송 과정에서 화물 이동 경로를 결정하는 문제를 Load Planning이라 명명하고 본 논문과 마찬가지로 비용 항목으로 링크 비용과 노드 비용을 고려하였다. 그들의 개척자적 연구를 기반으로 이 분야에 대한 많은 연구가 뒤따랐다. Powell(1986)은 먼저 제시된 수학적 모형을 더욱 발전시켰으며 아울러 보다 개선된 해법을 제시하였다. Powell and Sheffi(1989)는 그 동안의 연구 성과를 집대성하여 APOLLO 라 명명된 소프트웨어를 개발하였고 이 소프트웨어는 소화물 운송 기업의 계획 수립 도구로 사용되었다. Powell and Koskosidis(1992)는 Load Planning의 일부인 운송 계획수립 문제를 보다 심도있게 다루었다 이들이 제시한 수리 모형의 부족한 점은 링크 비용이 단순히 화물량의 증가에 비례하여 선형으로 증가한다고 가정하여 현실과는 약간의 차이가 있다는 점이다. 이런 가정은 계산 과정을 단순하게 하는 장점이 있으나 현실 반영 능력이 떨어진다. 본 연구에서는 투입된 차량의 대수에 따라 비용이 이산형으로 증가하는 비용 함수를 채택하여 현실 반영 능력을 향상시켰고, 이를 감안하여 새로운 해법을 제시하였다.

III. 모형 및 해법

1. 예비 분석 : 운송 네트워크와 비용 요소

소화물이란 단일 운송 수요량이 적게는 30Kg에서 많게는 5000 Kg에 불과하여 차량의 적재량(10t~15t)에 훨씬 미치지 못하는 화물을 지칭한다. 개개 화물량이 차량의 적재 능력에 못 미치기 때문에 운송 효율을 높이기 위하여 여러 운송 주문을 적절히 집중하여 차량의 적재율을 높이는 과정이 필요하고 이를 위하여 지역터미널 외에 중계터미널을 운영해야 한다. <그림 1>은 소화물 일관 운송 과정을 개념적으로 표현한 것이다.

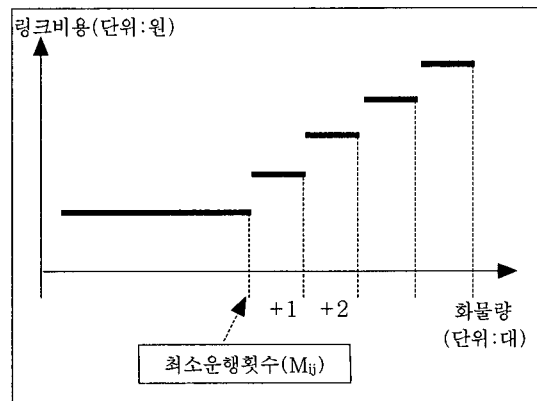


<그림 1> 소화물 일관 운송 과정

소화물 일관 운송 과정에서 지역터미널은 일정 지역을 담당하면서 자신의 구역 내에서 발생하는 모든 운송 수요를 집중하여 화물의 목적지별로 거쳐야 할 중계터미널로 보내는 역할과 자신의 구역 내로 배달되는 화물을 접수하여 최종 목적지까지 배달하는 역할을 수행한다. 중계터미널은 여러 지역터미널에서 집중된 화물을 목적지별로 분류하여 다음 중계터미널 또는 목적지 지역터미널로 보내는 역할을 수행한다. 운송 단계 측면을 보면 집하-간선 운송-배달의 단계를 거치게 되며, 본 연구에서는 출발지 지역터미널, 중계터미널, 목적지 지역터미널을 연결하는 간선 운송 단계에 관련된 비용을 다루는 것으로 연구의 범위를 제한한다. 즉, 소화물 일관 운송의 간선 운송 과정에서 발생하는 터미널과 터미널 사이의 링크비용과 터미널 내에서의 노드비용을 연구 대상으로 한다.

1) 링크비용

링크비용은 노드와 노드를 연결하는 링크에서 화물을 운반할 때 드는 비용으로 운전자의 인건비, 연료비, 차량의 운행 거리 증가에 따르는 정비비 및 감가상각비 등이 포함된다. 링크비용은 기본적으로 해당 링크를 통과하는 화물의 양에 비례하여 증가해야 하나, 주의해야 할 점은 화물의 양은 실수(real number)로 증가해도 비용은 계단 형태로 증가한다는 점이다. 이것은 링크비용이 주로 차량운행비용이기 때문인데, 예를 들어 구로-대전간 통과화물의 양이 1.2대분 이든지 1.9대분 이든지 링크비용은 2대의 차량에 해당하는 비용이 발생한다. 또한 어떤 링크에는 서비스 수준을 유지하기 위한 정책적 판단에 따라 일일 최소



<그림 2> 링크비용 증가 추이

운행 횟수가 부과되기도 하는데, 이런 경우에는 통과 화물량이 이에 못미친다 하더라도 최소 운행 횟수에 따르는 비용이 발생한다. 차량 운행 횟수가 같다 하더라도 화물 적재량에 따라 연료 소모가 달라 링크 비용에 약간의 차이가 있지만 이를 무시하면 링크별 통과 화물량에 따른 링크비용의 증가 추이는 <그림 2>와 같다.

2) 노드비용

노드비용은 터미널에서 화물을 하역, 분류, 적재하는 과정에서 발생하는 비용을 지칭하며 취급 화물량에 비례하여 증가하게 되므로 수학적으로는 단순히 일차함수로 표현할 수 있다.

이런 링크비용과 노드비용의 총합을 줄이는 것이 이 연구의 목적이고, 이 때 고려되는 의사 결정 변수는 화물 이동 경로이다. 다시 말하면 출발지 지역터미널과 목적지 지역터미널을 연결하기 위해 O/D별 화물을 어떤 경로로 운송하느냐에 따라 부담해야 하는 링크비용과 노드비용은 변하게 되며, 본 논문에서 제안하는 모형이 찾고자 하는 것은 링크비용과 노드비용의 총합을 최소화하는 O/D별 화물 이동 경로이다. 이때 화물 이동 경로는 목적지를 기준으로 TREE형태의 네트워크를 형성한다는 특징이 있다. 이는 소화물 일관 운송 기업이 관행으로 적용하는 원칙으로 "화물 운송 과정 중 어떤 터미널에 집중된 화물 중 동일 목적지인 화물은 출발지나 지금까지의 이동 경로와 관계 없이 다음 기착지는 같다"라는 것이 있기 때문이다(Powell and Sheffi, 1989, (주)한진 김국남 상

무와의 대화, 1997). 이런 원칙은 중계터미널에서의 분류작업을 단순화하고 개별 화물의 이동 경로 추적을 용이하게 하는 이점이 있다. <그림 3>은 목적지 s를 향한 TREE네트워크의 예를 보여주는 것으로 노드 i에 모인 화물 중에서 목적지가 s인 화물은 출발지에 관계없이 모두 노드 j로 운송되는 것을 알 수 있으며 또한 TREE네트워크에서는 노드 l에서 출발하여 노드 s로 가는 모든 화물은 l-i-j-s인 하나의 경로로 이동되는 특징이 있다.

2. 모형의 정립

이상에서 언급한 소화물 일관 운송 과정의 특징을 감안하여 링크 비용과 노드 비용의 합을 최소화하는 운송 경로를 찾기 위한 모형을 세우기 위하여 아래와 같은 변수들이 정의되어야 한다.

1) 운송 경로 표시 변수

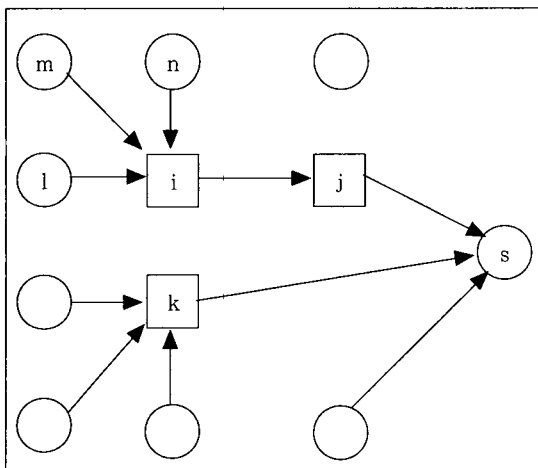
목적지 노드 s를 향한 화물의 이동 경로를 나타내는 변수로 p_{ij}^s 로 표시하며 0 또는 1의 값을 갖는다. 만일 $p_{ij}^s=1$ 이면 노드 s를 향해 가는 화물이 노드 i를 경유하여 노드 j로 이동하는 것을 의미한다. 동일 목적지 LTL 화물 운송은 TREE 네트워크 형태로 이루어지므로 $\sum_j p_{ij}^s=1, \forall s$ 의 관계가 성립한다.

2) 링크 통과 화물량

운송 주문에 따라 화물을 운송할 때 각 링크를 통과하는 화물량을 의미하고, 목적지별로 구분한 통과 화물량을 x_{ij}^s , 목적지 구분 없이 전체 통과 화물량을 x_{ij} 라 표시한다. 따라서 $x_{ij}=\sum_s x_{ij}^s$ 의 관계가 성립한다.

3) 노드 통과 화물량

노드비용을 계산하기 위하여 알아야 하는 변수로 중계 터미널에서 하역-분류-적재 과정을 거치는 화물량을 의미하고 z_n 으로 표시한다. 목적지에 관계없이 노드 n을 거쳐 다음 기착지로 출발하는 화물량을 의미하므로, 노드 n으로 모이는 화물 총량에서 그 노드가 종점인 화물량($\sum_i q_{in}$)을 제외한 나머지가 이에 해당한다. 따라서 위에서 정의한 링크 통과 화물 총량 x_{ij} 와는 $z_n=\sum_i x_{in}-\sum_i q_{in}, \forall n$ 의 관계가 성립한다.



<그림 3> TREE 네트워크 예

여기서 경로 표시를 위한 이진(binary) 변수인 p_{ij}^* 가 결정 변수가 되고, 기타 변수들은 결정변수 값이 결정됨에 따라 화물의 이동 경로가 결정 됨에 따라 기계적으로 계산된다. 위와 같은 변수 외에 문제를 표현하기 위하여 여러 가지 입력 자료가 필요하며 그 내용은 아래와 같다.

4) 노드비용 원단위

노드에서 발생하는 비용의 원단위를 의미하고, h_n 으로 표시한다(n 은 노드번호를 의미). 여기에서 주의해야 할 점은 노드비용 원단위를 정의할 때 화물 단위의 표준화가 먼저 선행되어야 한다. 이 표준화된 화물 단위는 다음에서 설명하는 링크비용 원단위를 정의할 때와 화물 O/D 수요량을 입력할 때도 같이 적용되어야 한다. 화물 단위로는 20' 컨테이너로 표준화하는 것이 노드비용 원단위 및 링크비용 원단위의 정의를 위하여 적절하다고 판단된다.

5) 링크비용 원단위

문제를 구성하는 네트워크에 포함된 모든 링크에 대하여 노드비용 원단위와 마찬가지로 표준화된 화물 단위 하나를 운송할 때 발생하는 비용을 지칭하며 c_{ij} 로 표시한다. 즉, $c_{ij}=100$ 이라면 노드 i 와 노드 j 사이를 화물 한 단위를 운송할 때 비용이 100(원) 발생하는 것을 의미한다. 사용자가 정의하지 않은 링크는 차량 운행이 불가능한 것을 의미하므로 프로그램 내에서 자동으로 ∞ 로 그 값이 주어진다.

6) 링크별 최소 운행 빈도

LTL 운송 서비스 사업에 있어서 화물 접수에서 배달까지의 총 소요 시간은 서비스 수준을 나타내는 중요한 지표이다. 경영 전략상 주요 시장에 일정 수준 이상의 서비스 수준을 보장하기 위하여 어느 특정 링크에는 화물의 과다에 관계없이 최소 운행 빈도를 유지하고자 할 때가 있다. 이러한 링크 최소 운행 빈도를 M_{ij} 라 표시하여 주기별 (1일 또는 1주) 최소 운행 횟수를 나타낸다..

7) 화물 O/D

노드 중에서 지역 터미널은 화물의 하역-분류-적재 과정이 필요없는 기중점이 되며 이러한 기중점 간의 화물 운송 수요를 q_{rs} 라 표시한다(r 은 출발지 노드, s

는 목적지 노드를 의미). q_{rs} 의 화물량을 입력할 때는 노드비용 원단위, 링크비용 원단위 산출 시 사용된 표준화된 화물 단위로 표기하여야 한다.

본 과제는 링크비용과 노드비용의 총합을 최소화 하는 화물 운송 계획 (링크별 통과 화물량) 을 결정 하는 문제이므로 우선 링크비용과 노드비용을 표현하는 수식을 세워야 한다.

8) 링크비용

임의의 링크(i, j)를 통과하는 화물량을 x_{ij} 라 하였으므로 링크비용 $F_{ij}(x_{ij})$ 은 아래와 같다.

$$F_{ij}(X_{ij}) = \begin{matrix} c_{ij} M_{ij}, & \text{if } X_{ij} \leq M_{ij} \\ \text{or} \\ C_{ij} [X_{ij}], & \text{if } x_{ij} > M_{ij} \end{matrix}$$

([] 는 소수점 이하를 올림한 정수를 의미함.)

9) 노드비용

노드 n 에서 처리되는 화물량을 z_n 이라 하였으므로 노드비용은 단순히 $h_n z_n$ 이 된다.

이상에서 살펴 본 변수, 비용 및 관계식을 통합하면 다음과 같은 수학적 모형을 정립할 수 있다.

$$\text{MINIMIZE } \sum_{(i,j)} F_{ij}(x_{ij}) + \sum_n h_n z_n \quad (1)$$

$$\text{Subject to } x_{ij} = \sum_s x_{ij}^s, \quad \forall (i, j) \quad (2)$$

$$x_{ij}^s = [q_{is} + \sum_k x_{ki}^s] p_{ij}^s, \quad \forall (i, j), s \quad (3)$$

$$\sum_j p_{ij}^s = 1, \quad \forall i, s \quad (4)$$

$$p_{ij}^s = 1 \text{ or } 0 \quad \forall (i, j), s \quad (5)$$

$$z_n = \sum_i x_{in} - \sum_i q_{in} \quad \forall n \quad (6)$$

식(1)은 링크비용과 노드비용의 합을 최소화한다는 것을 의미하며, 식(2)는 링크 통과 화물량은 목적지별 링크 통과 화물량의 합이라는 것을 표현하고 있다. 식(3)은 TREE 네트워크 형태로 화물이 이동할 때, 목

적지별 링크 통과 화물량을 계산하는 식이다. 즉, 링크 (i, j) 가 노드 s 를 향해가는 경로상에 있다면 p_{ij}^s 는 1이 되므로 목적지 s 를 향해가는 화물 링크 (i, j) 통과 화물량(x_{ij}^s)은 노드 i 가 출발지이고 노드 s 가 목적지인 O/D 화물량(q_{is})과 노드 s 가 목적지인 화물 중 중간에 노드 i 에 모인 화물량($\sum_k x_{ki}$)의 합이 되고, 링크 (i, j) 가 노드 s 를 향해가는 경로상에 있지 않다면 p_{ij}^s 는 0이 되어 x_{ij}^s 역시 0이 된다. 식(4)와 (5)는 목적지별 화물 이동 경로가 TREE 네트워크 형태가 된다는 것을 의미하고 있으며, 마지막으로 식 (6)은 노드비용을 계산하기 위하여 노드 통과 화물량을 결정하는 식이다.

3. 해법

제시한 모형의 식(1)에 포함된 링크비용 함수의 형태와 식(3)의 목적지별 링크 통과 화물량 결정 함수는, 표준 해법이 이미 나와 있는 선형계획법이나 정수계획법에서 별도의 수학적 조작 없이 바로 해결되는 형태의 수식이 아니어서 기존의 표준 해법으로는 풀 수가 없다. 정수 계획법으로 해결할 수 있는 형태로 변환한다 하더라도 현실 문제에 적용하려면 문제의 크기가 커져서 표준 해법으로 푸는 것이 불가능해진다. 따라서 본 연구에서는 위 모형의 최적해를 보장하지는 못하나 아주 양호한 해답을 제공하는 두개의 풀이 과정 (Algorithm)을 고안하였다.

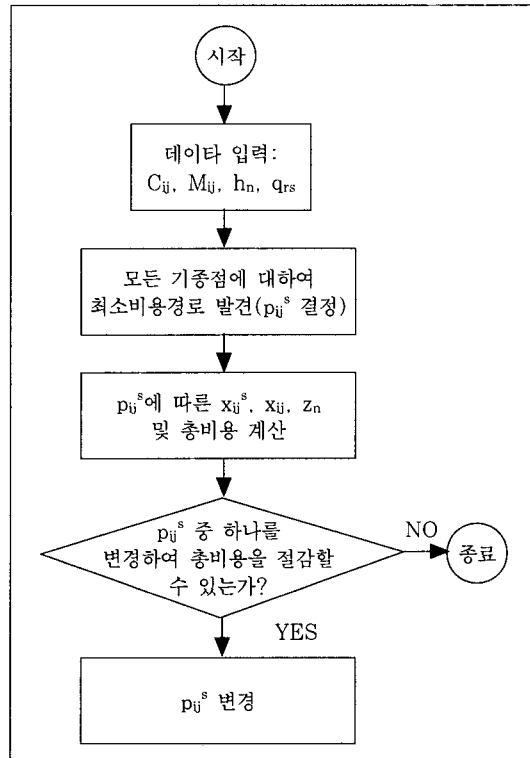
1) 풀이 과정 I

Steepest Descent Method라 불리는 풀이 과정 I은 현재의 해답에서 비용 절감의 효과가 가장 큰 변화를 반복적으로 추구하는 방법이다. 제시된 모형의 임의의 실행가능해는 목적지가 되는 노드별로 tree 네트워크를 형성하는 화물 운송 경로이다. 즉 목적지 노드 수와 같은 수의 tree 네트워크의 집합이 한 개의 실행가능해를 구성한다. 여러 개의 tree 네트워크에서 한 개를 선택하여 그 네트워크에 포함되어 있는 링크 한 개를 tree 형태를 유지하면서 다른 노드로 연결하면 화물 운송 경로가 일부 바뀌고 따라서 총비용도 변한다. 예를 들면, <그림 3>에서 노드 s 를 향한 화물 중 노드 i 에 모인 화물은 다음 기착지로 노드 j 를 통과하도록 되어 있다. 만일 노드 i 의

다음 노드가 노드 j 가 아니고 노드 k 라고 한다면, 노드 s 를 향한 화물 이동 경로에 변화를 초래하며 총비용도 변하게 되는데, 이는 또 하나의 실행가능해를 구성한다.

어떤 실행가능해에서 링크 하나를 변경함으로써 만들어지는 실행가능해를 이웃해라 하고, 이웃해의 집합 내에서 가장 비용 절감 효과가 큰 이웃해로 옮겨가면서 현재의 해답보다 좋은 해답을 반복하여 탐색하는 것이 풀이 과정 I의 핵심이다. 이를 단계별로 설명하면 아래와 같고 <그림 4>는 이 풀이 과정을 Flow Chart로 표현한 것이다. 이 해법을 적용하기 위해서는 탐색의 출발점이 되는 초기해(initial solution)가 있어야 하는데 이는 각 목적지 노드별로 최소비용 경로를 찾음으로써 발견할 수 있다.

1단계 (초기해 발견): 각각의 기중점 노드간 최소 비용 경로를 찾아 화물이 최소 비용 경로를 따라 이동한다고 가정하여 링크 통과 화물량, 노드 통과 화물량을 계산한다. 1단계 계산 결과는 각각의 기중점 화물만 생각하면 최선의 해결책



<그림 4> 풀이 과정 I의 Flow Chart

이나, 네트워크 전체로 보았을 때는 아직 개선의 여지가 많이 남아 있다.

2단계 (비용 절감 이웃해 발견): 총비용 절감 효과가 가장 큰 화물 이동 경로 수정을 발견한다. 여기서 지칭하는 이동 경로 수정은 동시 다발적인 수정이 아니라 기존의 이동 경로에서 링크 한 개만 바꾸는 수정을 의미한다.

3단계 (계산 종료 검사): 만일 총비용을 절감하는 화물 이동 경로 수정을 발견하지 못하면 계산을 중단한다. 그렇지 않으면 수정된 이동 경로를 따라 화물을 운송할 때의 링크 통과 화물량과 노드 통과 화물량을 계산하고 2, 3 단계를 반복한다.

2) 풀이 과정 II

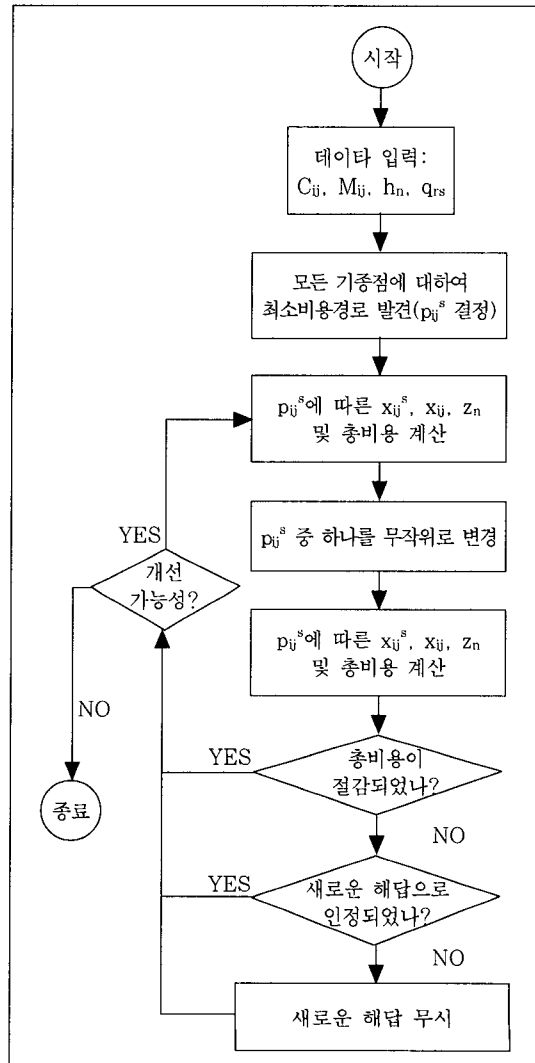
풀이 과정 I은 항상 현재 해답보다 더 좋은 해답을 반복적으로 발견함으로써 빠른 시간 내에 쓸만한 해답을 찾을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 제시된 모형은 multi-modal 형태의 비용 함수를 가지므로 탐색의 출발점이 되는 초기해에서 비용 절감 방향으로만 이동을 할 경우, 현재의 실행가능해에서 멀리 떨어져 있는 더 좋은 해답을 찾을 수 없다는 단점이 있다. 비유로 말하면 초기해가 속한 골짜기를 벗어나 산을 몇 개 넘으면 더 낮은 지점으로 갈 수 있지만, 풀이과정 I에 의한 탐색 방법으로는 반복적으로 낮은 곳으로만 이동하기 때문에 그 골짜기를 벗어날 방법이 없는 것이다. 즉, Local Optimization이 된다. 이런 단점을 보완하기 위한 방법으로 Simulated Annealing Method라 불리는 풀이 과정을 적용하였다.

풀이 과정 II는 풀이 과정 I과 마찬가지로 목적지 노드별 최소 비용 경로를 찾아 초기해로 삼는다. 풀이 과정 I과 다른 점은 비용 절감 효과가 가장 큰 이웃해만 쫓아가는 것이 아니라 무작위로 선택된 링크를 변경하여 이웃해를 발견한 다음, 총비용이 조금이라도 절감되었으면 이를 새로운 해답으로 인정하고, 총비용이 늘어났다 해도 일정 확률로 새로운 해답으로 인정하고 다시 무작위로 이웃해를 탐색하는 과정을 반복하는 것이다.

Simulated Annealing Method에 의한 알고리즘을 설계할 때는 탐색한 이웃해의 목적함수 값이 기존해의 값보다 나빠졌을 경우 새로 찾은 해를 받아들이는 확률을 iteration 횟수의 함수로 정의하여 탐색의 초

기에는 상당히 높은 확률 (1.0에 가까움)로 나쁜 해도 받아들이나, iteration이 점차 진행되면서 그 확률이 점차로 0.0이 되도록 줄어들도록 한다. 이 확률이 0.0된 시점부터는 나쁜 해를 받아들이지 않고 기존해보다 좋은 해를 탐색하고, 더 이상 개선이 불가능해지면 탐색과정이 종료된다. 이 확률이 1.0 가까워서 시작해서 iteration이 진행됨에 따라 점차로 줄어드는 속도는 알고리즘 설계자의 결정이며 감소율이 높으면 탐색 과정이 짧아지는 반면, 감소율이 낮으면 탐색 과정이 늘어나며 보다 좋은 해를 찾을 가능성이 높다.

총비용이 늘어나는 실행가능해도 받아 들임으로써 보다 좋은 해답을 찾을 가능성을 높이는 것이 풀이과정



〈그림 5〉 풀이 과정 II의 Flow Chart

II의 핵심이고 비용이 늘어난 이웃해를 받아들이는 확률은 탐색이 진행됨에 따라 점차로 줄어들어 결국 탐색이 종료된다. Simulated Annealing Method에 관한 보다 자세한 내용은 Kirkpatrick et al. (1983) 또는 윤복식과 조계연 (1996) 을 참조하기 바란다.

풀이 과정 I보다 훨씬 많은 해답을 탐색하므로 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있으나, 언제나 더 좋은 해답을 찾을 수 있는 풀이 과정 II를 단계별로 설명하면 아래와 같고 <그림 5>는 이 풀이 과정을 Flow Chart로 표현한 것이다.

- 1단계 (초기해 발견): 풀이 과정 I과 동일
- 2단계 (이웃해 발견): 현재의 화물 이동 경로를 구성하는 링크 중에서 무작위로 하나를 선택하여 진행 방향을 바꾼다.
- 3단계 (이웃해 평가): 만일 새로운 화물 이동 경로에 의한 총비용이 변경 전 총비용보다 적을 경우에는 새로운 해답으로 인정하고, 그렇지 않을 경우에는 일정 확률로 새로운 해답으로 인정한다. 인정되지 않았을 경우는 2단계로 돌아가 반복한다. (현재의 실행가능해보다 비용을 더 발생시키는 해를 받아 들이는 확률은 계산이 진행함에 따라 점차 줄어든다.)
- 4단계 (계산 종료 검사): 비용 절감이 가능한 이웃해를 발견할 가능성이 없으면 계산을 종료하고 그렇지 않으면 2단계로 돌아가 반복한다.

IV. 예제

1. 입력 자료

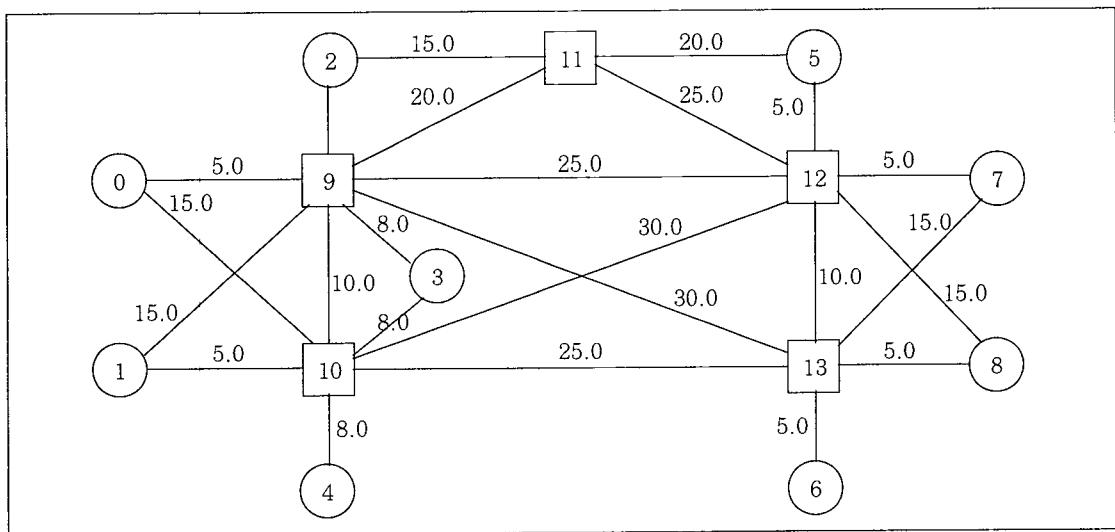
<그림 6>과 같은 운송 네트워크가 있다고 가정하자. 원형 노드는 지역 터미널이고 사각형 노드는 중계 터미널이다. 링크 위에 표시된 숫자는 해당 링크를 표준화된 차량 한 대가 이동할 때 발생하는 비용이고, 그림에 표시는 되지 않았지만 중계 터미널에서의 차량 한 대분의 화물을 취급하는데 필요한 비용은 20.0으로 가정하였다. 각 링크는 양 방향 통행을 의미하므로 전체 링크의 갯수는 그림에 표시된 링크 수의 두 배인 48개이다. 또한, 주요 고객들에 대한 서비스 수준을 유지하기 위하여 노드 10과 노드 13을 연결하는 양방향 링크의 최소 운행 빈도를 4회라고 가정하였다.

문제를 구성하는 또 다른 중요한 데이터는 O/D 화물량(q_{rs})이고, 아래의 표는 예제에서 사용한 O/D 화물량 데이터이다.

2. 계산 과정 및 결과 해석

1) 초기해 발견

이 문제를 해결하기 위한 첫번째 단계는 목적지별 최소 비용 경로를 발견하는 것이다. 이 연구를 통하여 개발된 프로그램은 이 최소 비용 경로를 'Next Node'라는 형식으로 표현하는데 <표 2>가 보여주고 있다.



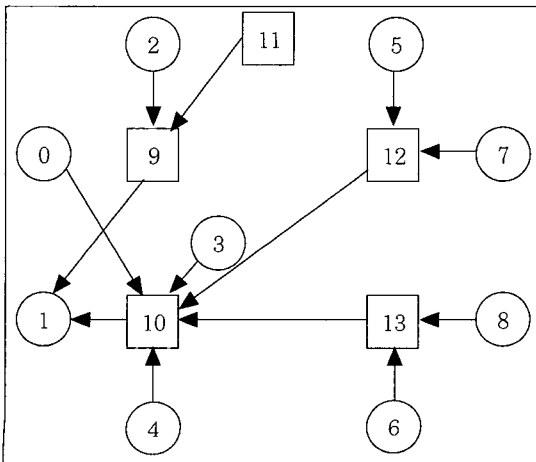
<그림 6> 예제에서 고려하는 가상의 네트워크

〈표 1〉 예제의 O/D 화물량 (단위:트럭 1대분 화물)

		목 적 노 드								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
출발노드	0	0.0	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3
	1	0.3	0.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.3
	2	0.3	0.3	0.0	0.2	0.2	0.2	0.4	0.3	0.4
	3	0.3	0.2	0.2	0.0	0.2	0.1	0.4	0.3	0.4
	4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.0	0.2	0.3	0.0	0.3
	5	0.3	0.3	0.3	0.4	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2
	6	0.3	0.7	0.2	0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1
	7	0.0	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.2	0.0	0.1
8	0.3	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2	0.3	0.2	0.0	

〈표 2〉 예제의 초기해를 나타내는 Next Node 표

		목 적 지 노 드								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
현재 노드	0	14	9	9	10	9	9	9	9	9
	1	9	14	9	10	10	10	10	10	10
	2	9	9	14	9	9	11	9	9	9
	3	9	10	9	14	10	9	10	9	10
	4	10	10	10	10	14	10	10	10	10
	5	12	12	11	12	12	14	12	12	12
	6	13	13	13	13	13	13	14	13	13
	7	12	12	12	12	12	12	13	14	13
	8	13	13	13	13	13	12	13	12	14
	9	0	1	2	3	10	12	13	12	13
	10	0	1	9	3	4	12	13	12	13
	11	9	9	2	9	9	5	12	12	12
	12	9	10	9	9	10	5	13	7	8
13	9	10	9	10	10	12	6	7	8	



〈그림 7〉 노드 1을 향한 최소비용경로

Next Node란 현재 노드에서 어느 목적지 노드를 향하여 갈 때, 다음 번에 들러야 하는 노드를 의미한다. 예를 들어 〈표 2〉에서 현재 노드 5번에 모인 화물 중 1번 노드가 목적지인 화물은 다음 경유지로 12번 노드로 가야 한다는 의미이다. 이 출력 자료에 근거하여 모든 노드로부터 노드 1을 향하는 최소 비용 경로를 그림으로 표현하면 〈그림 7〉과 같다.

〈그림 7〉에 나타난 노드 1을 향한 화물 운송 경로는 앞서 언급한 TREE 형태의 네트워크임을 알 수 있는데, 노드 0 부터 노드 8까지 모두 9개가 있다. 9개의 TREE 네트워크가 모여 하나의 실행가능해를 구성하며, 이에 따라 링크별 통과 화물량 및 노드별 통과 화물량을 계산할 수 있으며 따라서 링크비용 및

노드비용의 합인 총비용을 알 수 있다. 초기해는 목적지별로는 최소비용경로로 화물을 이동시키나 링크별 적재율이 매우 낮아 개선의 여지가 많다.

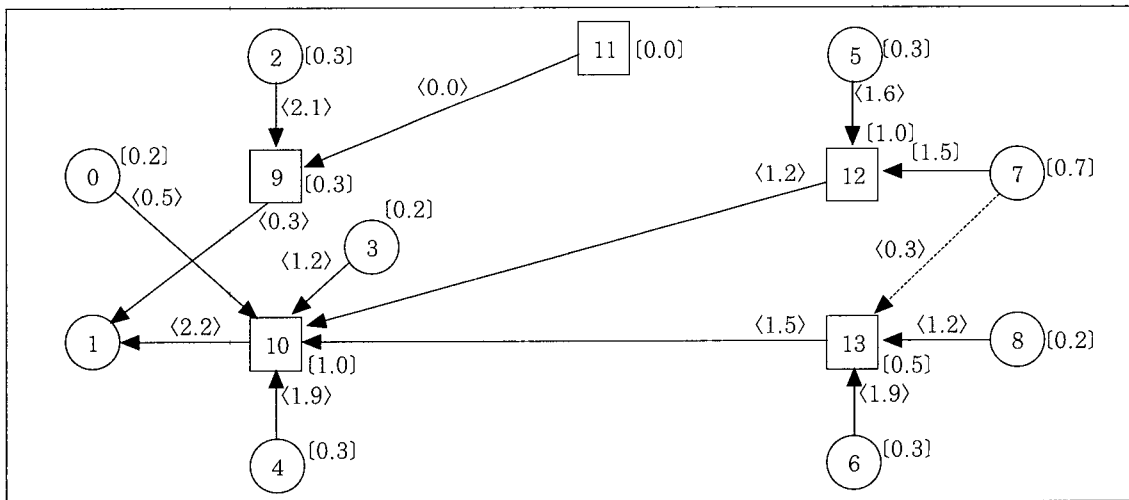
2) 이웃해 발견

초기해에서 비용절감이 가능한 이웃해로 옮겨가는 것이 풀이 과정의 핵심이다. <그림 7>의 노드 1을 향한 화물 운송 경로를 예를 들자. <그림 8>은 <그림 7>에 약간의 정보를 추가한 것으로, < >안의 숫자는 현재의 링크 통과 화물량을 의미하는데, <그림 8>은 노드 1을 향해가는 TREE 네트워크만 보여주고 있기 때문에 왜 그런 숫자가 나오는지 나타내지 않으나, 이 숫자는 노드 1을 향해가는 화물 뿐만 아니라 전체 네트워크에서 모든 O/D 화물의 운송 과정 중에 해당 링크를 통과하는 화물량을 보여준 것이다. []안의 숫자는 해당 노드에서 목적지인 노드 1을 향하는 총 화물량을 의미한다.

<그림 8>에서 기존의 운송 경로인 7→12→10→1을 7→13→10→1으로 변경할 경우의 영향을 받는 노

드는 12번과 13번이나 노드 12에서의 처리 화물량이 0.7 주는 대신 노드 13에서의 처리 화물량이 0.7 늘어나므로 노드비용에는 변화가 없다. 영향을 받는 링크 및 비용의 가감은 <표 3>와 같다.

즉, 운송 경로인 7→12→10→1을 7→13→10→1으로 변경함으로써 총비용 링크비용을 35.0 절감할 수 있다는 것을 알 수 있다. <표 4>은 운송 경로 변경을 반복적으로 수행할 때 나타나는 비용과 링크 통과 화물량의 변화 추이를 보여 준다. <표 4>의 비용 변화 추이를 살펴보면, 기중점 간의 최소 비용 경로에 의한 화물을 운송하는 것을 의미하는 1차 결과의 총비용은 1601.0이고 화물 이동 경로를 개선함에 따라 링크비용은 꾸준히 줄어드나 노드비용은 증가 추세에 있음을 알 수 있는데, 이는 차량의 적재율을 높이기 위하여는 중계 터미널로 화물을 모아야 하기 때문에 노드비용은 증가하는 것을 보여 주고 있다. 최종 결과의 총비용은 1411.0으로 1차 결과에 비하여 약 12%의 비용 절감을 이루었다.



<그림 8> 화물이동경로의 변경

<표 3> 운송 경로 변화에 의한 영향

시작노드	영향을 받는 링크		변경전 화물량	변경후 화물량	비용 가감
	끝노드	비용 원단위			
7	12	5.0	1.5	0.8	- 5.
12	10	30.0	1.2	0.5	- 30.
7	13	15.0	0.3	1.0	0
13	10	25.0	1.5	2.2	0

〈표 4〉 풀이과정 I에 의한 비용 절감 추이

	초기해	1차 개선	2차 개선	3차 개선	4차 개선	최종해
링크비용	1005.0	970.0	935.0	900.0	875.0		785.5
노드비용	596.0	596.0	596.0	600.0	600.0		626.0
총비용	1601.0	1566.0	1531.0	1500.0	1475.0		1411.0
평균적재율	0.626	0.643	0.660	0.682	0.694		0.774

3) 풀이 과정 II 적용

같은 문제를 풀이 과정 II를 적용하여 해답을 구하면 수 많은 대안을 탐색하기 때문에 중간 결과를 보여 주지는 못하지만 최종 결과는 〈표 5〉에 나타나 있다. 즉, 풀이 과정 I이나 풀이 과정 II 모두 같은 초기해로 부터 시작한다. 이 초기해의 링크비용, 노드비용, 총비용, 평균 적재율은 각각 1005.0, 596.0, 1601.0, 0.626이고 풀이 과정 I에 의한 최종해의 링크비용, 노드비용, 총비용, 평균 적재율은 각각 785.0, 626.0, 1411.0, 0.774인데 비하여 풀이 과정 II에 의한 최종해의 링크비용, 노드비용, 총비용, 평균 적재율은 각각 693.0, 660.0, 1353.0, 0.874로 풀이 과정 II가 훨씬 더 우수한 결과를 가져옴을 알 수 있다.

〈표 5〉 풀이 과정 I, II의 비교

	초기해	풀이과정 I 결과	풀이과정 II 결과
링크비용	1005.0	785.0	693.0
노드비용	596.0	626.0	660.0
총비용	1601.0	1411.0	1353.0
총비용감소	-	11.8%	15.5%
적재율	0.626	0.774	0.874

V. 결론

이 연구에서는 소화물 일관 수송 과정에서 발생하는 직접비용-링크비용과 노드비용을 최소화하고자 하는 수리모형과 풀이과정을 제시하였다. 이러한 네트워크 최적화 기법은 인프라에 대한 투자 없이 화물 운송 계획을 조정하여 비용을 줄일 수 있는 방법이므로 운송기업에서 큰 부담 없이 도입할 수 있다. 화물의 운송 경로 변경을 통하여 운송과정에서 발생하는 직접비가 상당부분 절감될 수 있다는 것은 예제의 풀이를 통하여 확인되었다.

본 논문에서 제시한 모형의 결과물은 운송 서비스 네트워크는 배차 계획 수립 시 어느 링크에 몇 대의 차량이 투입되어야 하는가를 보여주고 있다. 또한 모형을 최적해 탐색 목적 외에, 운영자들이 제시한 몇 개의 네트워크 대안에 대하여 평가 도구로 사용할 수도 있다. 즉, 터미널은 고정시켜 놓고 서비스 링크를 변화시키는 대안이나 터미널을 추가/폐쇄하는 대안인 네트워크 전체에 미치는 효과 분석용으로도 활용이 가능하다.

제시된 모형의 실무적 차원에서의 현실 반영 능력은 아직 확인 되지 않았으며, 실제 적용을 위해서는 운송 전문 기업의 운송 계획 실무자와의 보다 긴밀한 의사소통과 협조를 통하여 모형의 정밀도를 높여야 하는 것이 추후 과제이다.

또한 현 단계의 최종 결과는 구체적인 차량 운행 계획이 아니고 비용 최소화를 위한 화물의 링크별 이동량과 차량 운행 소요를 밝힌 것이다. 따라서 링크 운용계획의 최종 목표라 할 수 있는 공차 운행 계획을 감안한 차량 운행 계획(Vehicle Itinerary Design) 모형의 개발도 계속 추진되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 권오경, "거시경제적 물류비 추계와 시사점", 교통정책연구, 교통개발연구원, 제4권, 제1호, pp.25~48, 1997. 3.
2. 김국남, "(주) 한진 김국남 이사와의 대화 녹취", 1997. 8.
3. 윤복식, 조계연, "Smulated Annealing의 가속화와 ATM 가상 경로 설정에의 적용", 한국경영과학학회지, 제21권, 제2호, pp.125~140. 1996. 8.
4. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. and Vecchi, M., "Optimization by Simulated Annealing", Science, Vol. 220, pp.671~680, 1993. 5.
5. Powell, W.B. and Sheffi, Y., "The Load Planing

- Problem of Motor Carriers: Problem Description and a Proposed Solution Approach", *Transportation Research Part A*, Vol. 17, No. 6, pp.471~480, 1983.
6. Powell, W.B., "A Local Improvement Heuristic for the Design of Less-Than-Truckload Motor Carriers Networks", *Transportation Science* Vol. 20, No. 4, pp.246~257, 1986.
 7. Powell, W.B. and Koskosidis, I. A., "Shipment Routing Algorithm with Tree Constraints", *Transportation Science* Vol. 26, No. 3, pp.230~245, 1992.
 8. Powell, W.B. and Sheffi, Y., "Design and Implementation of an Interactive Optimization System for Network Design in the Motor Carrier Industry", *Operations Research*, Vol. 13, No. 1, pp.12~29, 1989.
 9. Roy, J. and Crainic, T. G., "Improving Intercity Freight Routing with a Tactical Planning Model", *Interface* Vol. 22, No. 3, pp.31~44, 1992.
 10. US DOT, "Motor Carrier Act of 1980", 1980.