

설비용량을 고려한 계층적 네트워크의 설계 및 분석†

이창호* · 윤종화** · 정한욱**

Designing hierarchical ring-star networks under node capacity constraints†

Lee Chang Ho* · Yoon Jong Hwa** · Jung Han Wook**

Abstract

This paper deals with a capacitated ring-star network design problem(CRSNDP) with node capacity constraints. The CRSNDP is formulated as a mixed 0-1 integer problem, and a 2-phase heuristic solution procedure, ADD & VAM and RING, is developed, in which the CRSNDP is decomposed into two subproblems: the capacitated facility location problem(CFLP) and the traveling salesman problem(TSP). To solve the CFLP in phase I the ADD & VAM procedure selects hub nodes and their appropriate capacity from a candidate set and then assigns them user nodes under node capacity constraints. In phase II the RING procedure solves the TSP to interconnect the selected hubs to form a ring. Finally a solution of the CRSNDP can be achieved through combining two solutions of phase I & II, thus a final design of the capacitated ring-star network is determined. The analysis of computational results on various random problems has shown that the 2-phase heuristic procedure produces a solution very fast even with large-scale problems.

* 인하대학교 산업공학과 교수

** 인하대학교 산업공학과 대학원

† 본 연구는 인하대학교 1992년도 연구비 지원에 의해 수행되었음.

1. 서 론

컴퓨터 및 통신 기술의 발달과 고도화 정보 서비스에 대한 수요의 증가로 인하여 정보 통신 네트워크의 규모는 거대화되고 있다. 현재의 대규모 통신 네트워크는 2 단계의 계층적 네트워크(two-level hierarchical network) 구조를 가지며 상위 계층은 허브 네트워크(hub network)로, 하위 계층은 지역 네트워크(local access network)로 구성되고 있다. 이러한 계층적 구조의 이점은 고도의 집적화와 기능의 공유를 통하여 네트워크 비용의 절감과 유연성 있는 네트워크 운영을 가능하게 하는데 있다 [17]. 2 계층 네트워크의 하나인 링-성상형 네트워크 구조(ring-star network structure)는 정보 통신 네트워크뿐만 아니라 물류 네트워크, 수송 네트워크 등과 같이 다양한 분야에서 적용되고 있다. 특히 근거리 통신망(LAN)의 경우에 IBM token ring과 FDDI token ring은 전형적인 링-성상형 네트워크 구조이며 [12], 최근 미국, 일본 등에서 구축되고 있는 Metropolitan Area Network와 cable TV network 등도 또한 같은 형태의 네트워크라고 볼 수 있다. 이러한 링-성상형 階層的 네트워크의 설계 시에는 상위 계층 네트워크와 하위 계층 네트워크의 적절한 조화가 중요하며, 따라서 체계적인 수리모형과 해법의 개발이 필요하다.

본 연구는 2 단계의 계층적 구조를 가지는 링-성상형 네트워크(ring-star network)의 위상 설계 문제(topological design problem)를 다루고자 한다. 네트워크의 위상설계는 주어진 그래프(graph)에서 특정 네트워크 구조들의 연결조건(connectivity)을 만족시키는 부분

그래프(sub-graph)를 얻는 것이다. 이렇게 얻어진 네트워크의 위상을 토대로 구체적인 통신 네트워크의 설계를 행하게 되는데 통신장비의 선택, 통신선로, 통신규약, routing 방법 등이 이에 속한다. 상위 계층의 기점마디(hub node)에 설치되는 설비에는 현실적으로는 용량의 한계가 존재하며 용량에 따라 비용이 다르므로, 이를 고려한 문제를 설비용량의 제약을 갖는 링-성상형 네트워크 설계 문제(capacitated ring-star network design problem: CRS-NDP)라 할 수 있다. 광통신 네트워크, 물류 네트워크 등의 기점마디 설비의 비용이 전체 네트워크 비용 가운데 상당히 큰 부분을 차지하고 있으므로 전체 네트워크 비용의 최적화에 중요한 의사결정 요인이며 [17], 또한 기점마디 설비의 기능의 중요성으로 보아 네트워크 설계에서 기점마디의 용량 제약 조건에 대한 고려는 매우 중요하며 특히 설계 모형에서의 설비용량의 고려는 최종 설계의 현실성 및 유용성을 증가시킨다.

링-성상형의 네트워크 설계 문제는 광범위한 응용 가능성이 있고 중요한 문제임에도 불구하고 본 연구와 같은 접근 방법에 의한 연구가 거의 없으며, 특히 통신네트워크의 위상설계와 유사한 수송네트워크의 설계문제에 관한 몇몇의 연구 결과 [2, 3, 4, 5, 7, 9, 14, 15]가 발표되었을 뿐이다. Current et al. [5]은 주어진 마디들로 구성된 네트워크 상에서 일부의 마디들을 선택해서 링형태의 네트워크 구조를 만들고 나머지 마디들은 링 네트워크 상의 마디와 일정한 거리 이내에 위치할 수 있도록 하는 문제(covering salesman problem)를 제시하고 이에 대한 발전적 해법을 제시한 바 있다. 본 연구와 비슷한 구조를 갖는 문제로는 판매원 문제에서 변형된 구매자 문제(traveling pur-

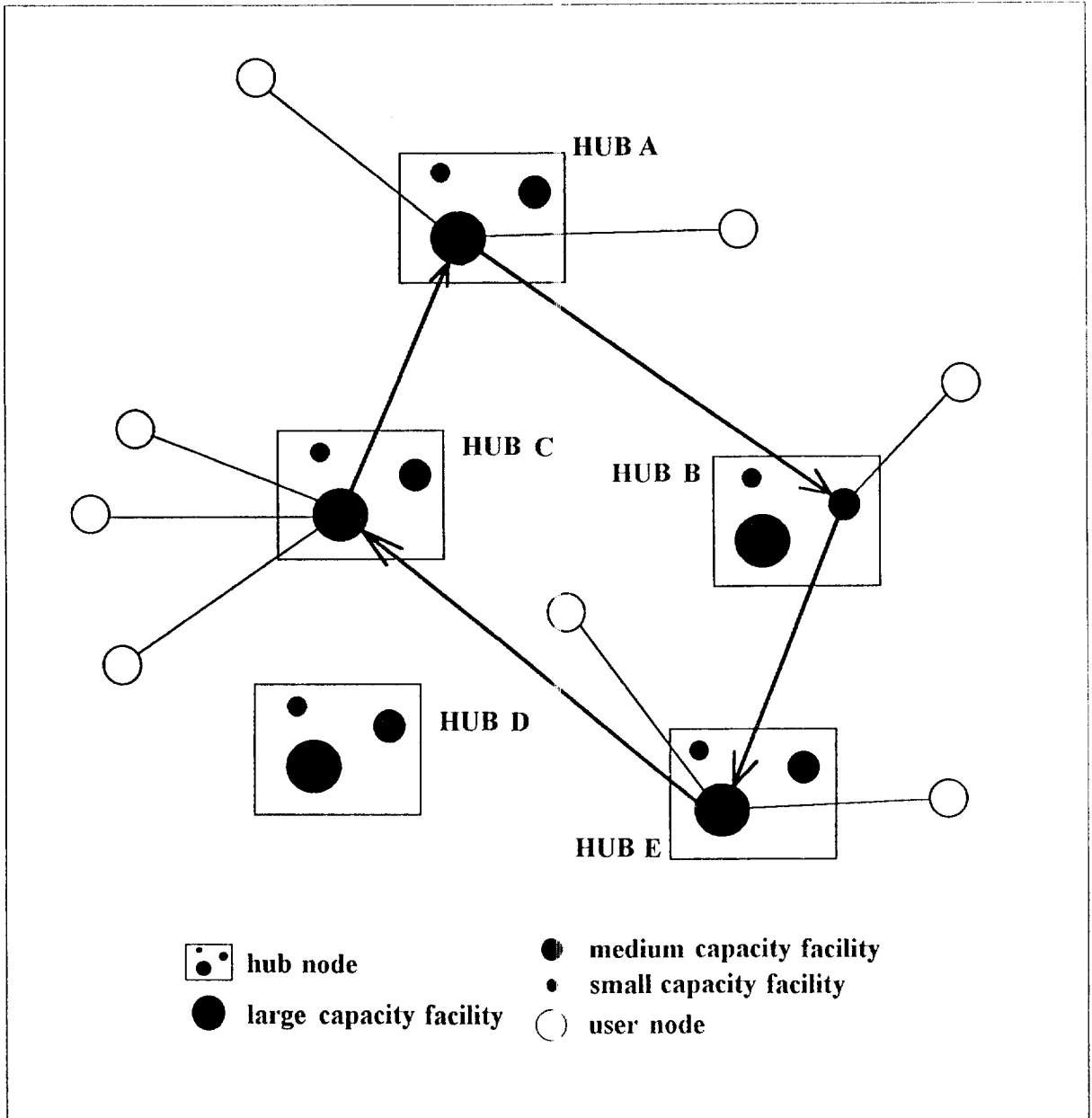
chaser problem, TPP)[13]와 Prize collecting TSP(traveling salesman problem)를 들 수 있으며, Vob[16]은 TPP를 응용해서 기본적인 구성 요소만을 고려하는 링 네트워크 설계 문제의 해법을 개발하였다. 최근에는 Lee et al.[9] 및 이창호의 학위논문[1]에서는 보다 일반화된 링-성상형 네트워크의 위상설계문제의 정식화 및 쌍대 기반 해법이 발표되었다. 그러나 이와 같은 모든 관련연구에서는 설비 용량의 제약 조건은 다루어지지 않았으므로 기점마디의 설비 용량을 고려한 링-성상형 2계층 네트워크 설계 문제의 정식화 및 해법 개발을 다루고자 한다는 점에서 본 연구의 의의를 찾을 수 있다.

2. 용량제약이 있는 링-星狀形 네트워크 설계

2.1 문제 설명

본 연구에서 다루고 있는 문제는 2단계 계층적 구조를 가지는 링-星狀形 네트워크의 위상 설계 문제에서 설비 용량의 제약이 있는 경우이다. 상위 계층 네트워크는 링형태를, 하위 계층 네트워크는 성상 형태를 갖는다. 링-성상형 2계층 네트워크를 통하여 트래픽(traffic)이 전송되며 각 트래픽은 임의의 두 사용자마디 사이의 통신량을 의미한다. 각각의 사용자마디들은 기점마디를 통하여 다른 사용자마디들과 트래픽을 교환하며, 기점마디는 출발 사용자마디에서 보내는 트래픽을 목표 사용자마디로의 전송 역할을 담당한다. 즉 이러한 기점마디 설비의 용량제약이 있는 문제이다.

대상이 되는 네트워크의 마디는 2가지 종류로 구성되는데 하나는 링형의 상위 계층 네트워크 상에 세워질 수 있는 후보 기점마디를 나타내며, 다른 하나는 일반적인 사용자마디를 나타낸다. 후보기점 마디는 허브설비(concentrator 또는 multiplexer)를 나타내며, 허브설비의 용량은 통신포트의 수, 시간당 최대 처리량, 버퍼의 크기 등으로 표현되는데 본 연구에서는 가장 간단한 통신포트의 수로 가정한다. 네트워크의 호(arc)는 마디들을 연결시킬 수 있는 통신선로 또는 수송통로를 나타낸다. 이러한 전체 네트워크가 주어졌을 때, 설비용량을 고려한 계층적 네트워크 설계문제에서의 상위 계층 네트워크를 구성하려면 여러 개의 후보 기점마디(hub node)들 가운데 일부를 선택함과 동시에 각 기점마디들의 설비 용량을 결정하고, 이러한 기점마디들을 링형으로 연결하여야 한다. 즉, 모든 후보 기점마디마다 개설 여부를 결정하고 동시에 사용자마디의 수요를 충족시킬 수 있도록 각기 다른 설비의 용량 중에서 하나를 선택한다. 상위 계층의 기점마디에 설치된 설비의 용량과 각 사용자마디의 수요(트래픽)를 고려해야 하므로 기점마디와 사용자마디의 연결에 제약이 가해진다. 그러므로 모든 사용자마디의 수요 및 교환조건을 만족시킬 수 있도록 기점마디들은 충분한 설비 용량을 가져야 하며 기점마디의 설비 용량과 사용자마디의 수요를 고려하여 사용자마디들을 기점마디에 연결하여야 한다. 따라서 각 사용자마디는 상위계층 네트워크상의 기점마디에 일대일(point-to-point)로 연결됨으로써 성상형의 하위 계층 네트워크가 구성되어 전체적으로는 링-성상형 2단계 계층적 네트워크가 이루어진다. [그림 1]은 이러한 문제의 한 예를 보여주고 있는데 후보 기점마디(HUB A,



[그림 1] 容量制約이 있는 링-星狀形 네트워크 설계 문제
(Capacitated ring-star network design problem)

B, C, D, E)들 가운데 HUB A, C, E는 大容量設備를 HUB B는 中容量設備를 개설하도록 선택되어 링형으로 연결되고, 사용자마디는 각각 선택된 기점마디에 일대일 연결되어 있다.

문제를 보다 자세히 설명하면 다음과 같다.

- (1) 후보 기점마디의 입지와 사용자마디의 입지가 알려져 있다.
- (2) 사용자마디들 사이의 물품 교환 조건 및 수요(트래픽 교환량)가 알려져 있다.
- (3) 후보 기점마디 설비의 용량 및 비용이 알려져 있다.
- (4) 사용자 사이의 트래픽 교환을 처리하는 기점마디 설비의 용량에는 제약이 있으나 기점 마디에 연결 될 수 있는 사용자마디의 최대 개수 및 호의 용량에는 제한이 없다.
- (5) 각 트래픽은 출발마디와 목표마디를 가지며 사용자마디쌍 간에는 두 가지 서로 다른 트래픽을 주고받는다.
- (6) 모든 트래픽은 상위 계층 링형 네트워크 상에서는 단일 방향으로 흐른다-이 조건은 제한적일 수 있으나 링형 구조의 통신 네트워크에서의 흐름의 형태를 잘 반영하고 있다.
- (7) 두 종류의 비용을 고려한다.
 - { 기점마디설비의 개설비용
 - { 하위 및 상위계층 네트워크의 호 건설비용

위와 같은 비용 구조를 가지고, CRSNDP 는 사용자마디의 트래픽 교환 수요를 만족시키

면서 비용을 최소화 할 수 있도록 기점마디 설비의 용량 선택을 포함하는 링형 상위 계층 네트워크의 건설과 사용자마디와 기점마디의 연결형태를 결정한다.

2.2 문제의 정식화

마디 집합 N 과 호(arc) 집합 A 로 이루어진 네트워크를 고려해 보자. 마디 집합 N 은 기점마디 집합 N_1 과 사용자마디의 집합 N_2 의 두 종류의 마디들로 구성되어 있으며, 호 집합 A 는 기점마디 사이의 유방향 호 집합 A_1 과 기점마디-사용자마디 사이의 무방향 호 집합 A_2 로 이루어진다. 편의를 위해서 j 와 l 은 기점마디의 첨자로, i 는 사용자마디의 첨자로 구분하여 사용한다. 두 사용자 마디 사이의 트래픽 교환량을 네트워크 이론의 물품(commodity)으로 볼 수 있으며, K 는 물품 집합이며, 각각의 물품 $k \in K$ 는 출발마디 $O(k)$ 를 출발하여 목적마디 $D(k)$ 에 도착하고 그 양을 1로 가정한다. 설비 용량 제약을 갖는 링-성상형 2 단계 계층적 네트워크 설계 문제는 혼합 0-1 정수계획법으로 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

다음의 수리모형은 물품 집합 K 가 모든 사용자마디간의 교환 물품을 포함하지 않는 경우에도 링-성상형 구조의 네트워크의 설계를 보장하지만, 최소한으로 하나의 사용자마디와 그 이외의 모든 사용자마디들 사이의 상호교환조건이 가정되어야 링-성상형 네트워크의 연결 조건은 만족된다. 즉, $|K| \geq 2(|N_2| - 1)$.

(CRSNDP P)

$$\text{Minimize } Z = \sum_{j \in N_1} \sum_{m \in M} f_m Z_m + \sum_{ij \in A_1} d_{ij}^1 y_{ij}^1 + \sum_{ij \in A_2} d_{ij}^2 y_{ij}^2 \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j \in N} x_{ji}^k - \sum_{j \in N} x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & i = D(k), \\ -1, & i = O(k), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in K, \quad (2)$$

$$x_{jl}^k \leq y_{jl}^1, \quad \forall (j, l) \in A_1, k \in K, \quad (3)$$

$$x_{ij}^k + x_{ji}^k \leq y_{ij}^2, \quad \forall (i, j) \in A_2, k \in K, \quad (4)$$

$$\sum_{l \in N_1} y_{jl}^1 \leq \sum_{m \in M} z_{jm} \quad \forall j \in N_1, \quad (5)$$

$$\sum_{l \in N_1} y_{lj}^1 \leq \sum_{m \in M} z_{jm} \quad \forall j \in N_1, \quad (6)$$

$$\sum_{l \in N_1} y_{ij}^2 = 1, \quad \forall i \in N_2, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_2} y_{ij}^2 b_i \leq \sum_{m \in M} z_{jm} a_m \quad \forall j \in N_1, \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M} z_{jm} \leq 1, \quad \forall j \in N_1, \quad (9)$$

$$y_{jl}^1, y_{ij}^2, z_{jm} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, i \in N_1, i \in N_2, m \in M, \quad (10)$$

$$x_{ij}^k, x_{ji}^k, x_{il}^k \geq 0, \quad \forall j, l \in N_1, i \in N_2, k \in K. \quad (11)$$

사용된 변수의 의미는 다음과 같다.

- z_{jm} : 기점마다 j 에 m 의 설비에 관한 0-1 변수,
- y_{jl}^1 : 상위 계층 링형 네트워크의 有方向 호(j, l)의 건설에 관한 0-1 변수,
- y_{ij}^2 : 하위 계층 네트워크의 無方向 호(i, j)의 건설에 관한 0-1 변수,
- x_{jl}^k : 유방향 호(j, l)상에 유통되는 물품 k 의 흐름량을 표시하는 비음 변수,
- x_{ij}^k : 물품 k 에 대해서 $O(k)=i$ 가 되는 무방향 호(i, j)상에 유통되는 흐름량을 표시하는 비음변수, $j \in N_1$,
- x_{il}^k : 물품 k 에 대해서 $D(k)=i$ 가 되는 무방향 호(i, j)상에 유통되는 흐름량을 표시하는 비음변수, $j \in N_1$,
- f_{jm} : 기점마다 j 에 m 의 설비의 건설에 드는 비용,
- d_{jl}^1 (d_{ij}^2) : 유방향 호(j, l) (무방향 호(i, j))의 건설에 드는 비용,
- b_i : 사용자마다 $i \in N_2$ 의 수요이며, 사용자 i 가 다른 사용자마다와 교환하여야 할 흐름량의 총합이다,
- a_m : 기점마다 j 에 건설되는 설비 m 의 용량,
- M : 사용 가능한 설비의 집합.

목적함수 (1)은 전체 네트워크를 건설하는데 드는 비용, 즉, 설비의 개설, 선택된 기점마디 사이의 상위 계층 호 건설, 사용자마디와 기점마디 사이의 하위 계층 호의 건설에 드는 총비용을 최소화 하고자 함을 뜻한다. 제약식 (2)는 네트워크 연결 조건과 동시에 각 물품의 흐름 조건을 보장하는 일반적인 흐름보존식이다. 제약식 (3)과 (4)는 물품이 건설된 호에서만 흐르도록 한다. 제약식 (5)와 (6)은 상위 계층 네트워크 상의 호가 반드시 선택된 기점마디들 사이에서만 건설 가능하도록 한다. 따라서 선택된 기점마디의 출력 호와 입력 호의 수는 각각 최대한 1이다. 제약식 (7)은 각각의 사용자마디가 선택된 기점마디 중에서 반드시 한 개의 기점마디에만 연결되도록 한다. 제약식 (8)은 선택된 기점마디의 설비의 용량이 그 기점마디에 연결된 사용자마디들의 수요(물품 교환량, 트래픽의 교환량)의 총합이상이 되도록 한다. 제약식 (9)는 여러 용량의 설비들 중에 반드시 1개 이하의 설비를 선택된 기점마디에

설치하도록 한다.

3. 發見的解法

CRSNDP P는 NP-complete에 속하는 문제로서 적절한 시간 안에 최적해를 구하기 힘든 어려운 문제로서 발견적 해법의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 상기의 문제를 발견적 해법이 가능하도록 각각 하위계층 상위계층의 문제로 구분하기위해, CRSNDP P를 용량 제약이 있는 설비 입지 선정 문제(Capacitated Facility Location Problem : CFLP)와 외판원 문제(Traveling Salesman Problem : TSP)로 분해하여 1단계에서는 CFLP P₁을 풀고, 2단계에서는 TSP P₂의 해를 구하여 둘을 결합함으로써 전체 문제인 CRSNDP P의 발견적 해를 얻는다.

(CFLP P₁)

$$\text{Minimize } Z_1 = \sum_{j \in N_1} \sum_{m \in M} f_{jm} z_{jm} + \sum_{(i,j) \in A_2} d_{ij}^2 y_{ij}^2 \tag{12}$$

subject to

$$\sum_{j \in N_1} y_{ij}^2 = 1 \quad \forall i \in N_2, \tag{7}$$

$$\sum_{i \in N_2} y_{ij}^2 b_i \leq \sum_{m \in M} z_{jm} a_{jm}, \quad \forall j \in N_1, \tag{8}$$

$$\sum_{m \in M} z_{jm} \leq 1, \quad \forall j \in N_1, \tag{9}$$

$$y_{ij}^2, z_{jm} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_2, j \in N_1, m \in M. \tag{13}$$

CFLP P_1 은 후보 기점마디들 가운데 일부 마디를 선택(식 (9))하여 각각의 사용자마디들을 선택된 기점마디들 가운데 하나의 마디에 연결하고(식 (7)), 연결된 사용자마디들의 수요(물품교환량)가 기점마디의 설비 용량을 넘지 않도록 하면서(식 (8)) 기점마디 설비의 개설 비용과 기점마디와 사용자마디를 연결하는 호의 건설비용을 최소화(식 (12)) 한다. 이러한

CFLP P_1 의 해는 건설될 기점마디의 선택 및 설비 용량을 결정하며, 사용자마디와 기점마디의 경제적인 연결 형태를 결정할 수 있도록 한다. 즉, 링-성상형 2단계 계층적 네트워크의 하위 계층 네트워크가 구성된다. 다음으로는 선택된 기점마디들을 링형으로 연결하기 위하여 TSP P_2 의 해를 구한다.

(TSP P_2)

$$\text{Minimize } Z_2 = \sum_{(j,l) \in A_1} d_{jl}^1 y_{jl}^1, \quad (14)$$

subject to

$$\sum_{j \in N} x_{ji}^k - \sum_{j \in N} x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & i = D(k), \\ -1, & i = O(k), \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in K, \quad (2)$$

$$x_{jl}^k \leq y_{jl}^1, \quad \forall (j, l) \in A_1, k \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{l \in N_1} y_{jl}^1 \leq \sum_{m \in M} \bar{z}_{jm} \quad \forall j \in N_1, \quad (5)$$

$$\sum_{l \in N_1} y_{lj}^1 \leq \sum_{m \in M} \bar{z}_{jm} \quad \forall j \in N_1, \quad (6)$$

$$y_{jl}^1 \in \{0, 1\}, \quad \forall j, l \in N_1, \quad (15)$$

단, \bar{z} 는 앞의 CFLP P_1 에서 선택된 기점마디들이며, A_2 에 해당하는 x_{ij}^k 와 x_{ji}^k ($k \in K$)는 P_1 에서 하위계층 네트워크의 구성에 의해서 결정된다.

TSP P_2 는 최소비용의 링이 구성될 수 있도록 하는데, 앞의 CFLP P_1 의 해에서 선택된 기점마디들을 링형으로 연결하는 경제적인 상위계층 호를 선택함으로써 상위 계층 네트워크를 구성한다. 따라서 CFLP P_1 의 해에서 얻은 성상형 하위계층 네트워크와 TSP P_2 의 해에서 얻은 링형 상위 계층 네트워크를 결합하여 전체 문제인 CRSNDP P 의 해를 구한다.

3.1 2 段階 發見的解法

CRSNDP P 를 두개의 문제로 분해해서 단계 1에서는 기존의 CFLP의 발견적 해법을 수정하여 활용하여 앞의 CFLP P_1 을 풀고, 단계 2에서는 TSP의 발견적 해법을 이용하여 TSP P_2 를 푼다. 단계 1과 단계 2에서 얻은 해를 결합하여 CRSNDP P 의 최종해를 구한다.

단계 I : ADD & VAM Procedure

CFLP는 Domshke & Drexl[6]이 ADD휴리스틱을 사용하여 좋은 해를 얻었으나 그들이 다루었던 문제는 각 기점마다 하나의 용량만을 가지고 있으며, 전체적으로는 각각의 기점마다들의 용량은 서로 다른 설비입지선정문제였다. 따라서 본 연구의 CFLP P₁을 풀기 위해서는 그들이 사용했던 ADD휴리스틱의 수정이 필요하며, 그 이유는 하나의 기점마다에 각기 다른 용량의 여러 설비가 설치 가능하지만 하나의 설비만을 선택하여 설치하여야 하며, 사용자마다의 수요는 반드시 개설된 하나의 기점마다의 설비에 의해서만이 충족되어야 한다는 가정(사용자마다와 기점마다 사이의 일대일 연결) 때문이다. ADD휴리스틱과 수송계획문제의 좋은 해를 구하는 방법인 보겔의 추정법(Vogel's Approximation Method, VAM)을 사용하여 초기해를 얻은 후, 교환법을 이용하여 해를 개선한다.

ADD & VAM Procedure

- i) $I_1 = \emptyset$ 와 $I_2 = N_1$ 으로 놓는다. 여기서 N_1 은 선택된 기점마다의 집합이고 N_2 는 나머지 후보 기점마다의 집합이다.
즉, $I_1 \cup I_2 = N_1$.
- ii) 다음의 우선순위규칙에 의하여 기점마다 $j \in I_2$ 의 설비 m 을 사용자마다의 수요(물품 교환량)이상이 될 때까지, $\sum_{j \in I_1} a_{jm} \geq \sum_{i \in N} b_i$, I_1 에 추가한다. 단, I_1 에 이미 속해 있는 기점마다 $j \in I_1$ 는 설비 m 을 중복하여 개설할 수 없다. 다음의 우선순위규칙들은 Domshke & Drexl[6]의 우선순위규칙을 본 내용에 맞게 수정을 한 것이다.

$R_1 : a_{jm}/f_{jm}$ 이 큰 순서로 기점마다 $j \in I_2$ 의 설비 I_1 을 에 추가한다.

$R_2 : (\sum_{i \in N} b_i / \sum_{i \in N} d_{ij}^0) \cdot a_{jm} / f_{jm}$ 이 큰 순서로 기점마다 $j \in I_2$ 의 설비 m 을 I_2 에 추가한다.

$$R_3 : \sum_{i=1}^{N+3} \frac{d_{ij}^0}{[|N_2|+3]} + \frac{f_{jm}}{a_{jm}}$$

이 작은 순서로 기점마다 $j \in I_2$ 의 설비 m 을 I_1 에 추가한다.

$\{d_{ij}^0, \dots, d_{iN}^0\}$ 는 $\{d_{i1}^0, \dots, d_{iN}^0\}$ 이 오름차순으로 정렬된 것이다.

iii) 개설된 기점마다 상의 설비에 사용자마다의 일대일 연결을 고려하면서 VAM을 이용하여 수송 계획 문제를 푼다. 각 사용자마다별로 최소의 기점마다와의 연결 비용과 두 번째로 작은 기점마다와의 연결 비용의 차가 별점이 되며, 내림차순으로 즉, 별점이 큰 사용자 마다부터 고려한다. 그리고 각 사용자마다는 별점이 큰 것부터 I_1 내의 개설된 설비에 연결된다. 만일 모든 사용자마다가 설비에 할당될 수 없을 경우에는 추가로 미개설된 기점마다 $j \in I_2$ 들 중에서의 설비 m 을 개설한다.

iv) i) ~ iii)에서 구한 초기해를 개선한다. 개설된 기점마다의 용량을 변경해서 비교한다.

규칙 R_3 은 단위 용량만 비용이 적은 기점마다 $j \in I$ 의 설비 m 을 선호한다. 그러나 사용자마다와 기점마다의 연결 비용(하위계층 네트워크의 호)의 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다.

규칙 R_2 는 기점마다 설비가 모든 사용자마다들에게 서비스를 제공하는데 발생하는 평균비용(하나의 개설된 기점마다와 모든 사용자마다 사이의 호의 건설에 드는 비용의 평균)의 역수에 a_{jm} 을 곱하고 f_{jm} 를 차감한 양이 큰 기점마다 $j \in I_2$ 의 설비 m 을 선호한다.

규칙 R_3 은 규칙 R_2 와 유사하지만 사용자마다와 개설된 기점마다 사이의 연결 비용의 합은 $\lfloor |N_2|/3 \rfloor$ 개의 ‘근접한’ 사용자 마디의 연결 비용의 합으로 대체된다. 물론 $\lfloor |N_2|/3 \rfloor$ 개의 ‘근접한’ 사용자마다 모두가 하나의 기점마다에 연결된다는 보장은 없으므로 일반적으로 사용될 때에는 고려하는 ‘근접한’ 사용자마다 개수가 상황에 맞게 적절히 조정되어야 한다. 물론 $d_{ij}^0 = \infty$ 인 경우에는 고려 대상에서 제외되어야 한다.

i) 설비의 개설 비용

기점마다	1	2	3	4	5
비용	380	210	390	270	250

ii) 설비 용량과 비용

종류	1	2	3
용량	100	300	500
비용	50	100	150

iii) 사용자 수요(물품교환량)

사용자	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	계
수요	95	180	25	130	120	200	150	140	100	45	1,185

iv) 후보 기점마다 사이의 상위 계층 호의 건설비용

$i \backslash j$	1	2	3	4	5
1	—	200	125	230	270
2	200	—	200	180	210
3	125	200	—	220	230
4	230	180	220	—	270
5	270	210	230	270	—

단계 II : RING Procedure

단계 I 에서 선택된 기점마다들을 링형태로 연결한다.

- i) 초기 Ring 구성 : TSP에서 사용되는 Nearest Neighbor/Nearest Insertion 발견적 해법 사용[8]
- ii) 초기해의 개선 : TSP의 2-opt, 3-opt 교환법[8].
- iii) 전체 해의 개선 : 개설된 기점마다와 개설되지 않은 기점마다를 교환한다.

3.2 발견적 해법의 適用例

1) 적용 예제에 대한 자료

4. 計算結果

ADD & VAM Procedure와 RING Procedure의 2단계 발견적 해법의 효율성을 알아보기 위하여 C언어로 프로그램 하여, Intel 486 33Mhz CPU PC에서 실행되었다. 표본 문제의 입력 자료(비용)는 기점마디와 사용자마디의 연결 비용은 [1, 50]의 구간에서, 기점마디의 설비 개설 비용은 [200, 600]의 구간에서, 사용자 수요(물품교환량)는 [10, 200]의 구간에서, 기점마디 간의 연결비용은 [100, 300]의 구간에서 랜덤하게 추출되었다. 계산 결과는 각각의 표본문제 별로 10개의 표본 결과를 평균하여 <표 2>에 요약되어 있다. <표 2>의 CPU 시간은 표본 문제 생성 시간과 입출력 시간을 포함하지 않는다.

본 연구의 2단계 발견적 해법의 규칙 R_1 , R_2 , R_3 모두가 비슷한 결과를 보이고 있고 표본문제 10부터 계산시간이 급격히 늘어났는데, 이는 해의 개선을 위한 RING procedure의 기점마디 교환에 의한 것으로 개설된 기점마디의 수와 개설되지 않은 기점마디의 수에 의해서 좌우된다. 그러나 전체적으로 볼 때 짧은 계산 시간은 비교적 큰 문제에 대해서도, 즉, 현실적으로 상당히 큰 규모의 CRSNDP를 적절한 시간 내에 풀어서 좋은 해를 제공할 수 있음을 보여준다.

5. 結 論

기술의 발달에 의한 위상의 변화와 서비스의 고도화에 대한 수요의 증가와 같은 상황의 변

화는 반드시 네트워크 설계 시에 반영되어야 한다[12]. 요즘의 두드러진 상황의 변화 중에서 광통신 네트워크의 채택의 증가를 들 수 있는데, 그 결과 네트워크의 생존력이 매우 중요한 네트워크 평가 기준으로 인식되고 있으며, 또한 광통신 교환설비가 아직까지는 매우 고가이므로 기점마디의 비용이 전체 네트워크 비용에서 매우 큰 부분을 차지하게 되었다. 이러한 현실을 감안하면 생존력이 높으면서도 경제적인 네트워크 구조인 링형 네트워크의 설계에 관한 체계적인 연구가 필요하며, 특히 광통신 네트워크에서 호의 용량은 무한대로 가정해도 좋을 만큼 크므로 전체 링의 용량 제약 조건은 설비용량에 매우 의존적이므로 설비용량의 제약은 매우 중요한 연구 주제가 될 것이다. 또한 위상설계와 통신규약 전송서비스 특성 등의 통합된 네트워크 설계에 관한 연구도 가치 있는 연구가 될 것이다. 본 연구에서는 이러한 설비용량의 제약이 있는 링-성상형 2단계 계층적 네트워크의 설계문제를 혼합 0-1 정수계획법으로 모형화하고 발견적 해법을 개발함으로써 경제적이면서 현실성이 높은 네트워크의 설계가 가능하도록 했다. NP-complete 문제인 TSP와 용량제약이 있는 입지선정문제를 포함하는 복잡한 위 문제의 해를 손쉽게 구하기 위하여 두 개의 문제로 분해하여, 제1단계에서는 용량제약이 있는 설비입지문제를 ADD & VAM 휴리스틱을 이용하여 해를 구하여 기점마디의 용량 및 위치를 결정함과 동시에 사용자마디를 선택된 기점마디에 연결형태를 결정한다. 제2단계에서는 앞에서 선택된 기점마디들을 링형으로 연결하여 최종의 링-성상형 네트워크를 완성한다. 본 연구의 발견적 해법의 효율성을 보이기 위해 다양한 유형의 문제에 대한 계산을 실행하였으며, 그 결과 규모가 큰

〈표 2〉 랜덤하게 발생된 표본의 계산결과

문제	문제 크기 $ N_1 \times N_2 $	우선순위	기점마디 설비용량	시 용 자 할 당 비용	링비용	총비용	CPU 시간 (sec)
1	5×20	R ₁	713.7	283.1	915.7	1912.5	0.01
		R ₂	699.9	284.8	891.1	1875.8	0.01
		R ₃	698.7	278.3	895.1	1872.1	0.01
2	10×30	R ₁	1091.3	348.9	1020.0	2460.2	0.01
		R ₂	1112.4	320.6	1058.7	2491.7	0.02
		R ₃	1101.1	357.2	1027.5	2485.8	0.04
3	10×40	R ₁	1358.2	357.0	1328.9	3044.1	0.02
		R ₂	1387.8	361.1	1345.6	3094.5	0.02
		R ₃	1362.6	355.4	1337.9	3055.9	0.05
4	15×30	R ₁	1087.8	390.1	986.5	2464.4	0.04
		R ₂	1151.9	358.5	1061.0	2571.4	0.03
		R ₃	1123.7	413.5	1031.3	2568.5	0.09
5	15×40	R ₁	1495.0	431.1	1398.1	3324.2	0.06
		R ₂	1512.1	380.4	1366.3	3258.8	0.07
		R ₃	1490.2	499.5	1360.0	3299.7	0.14
6	20×40	R ₁	1454.0	433.9	1282.9	3170.8	0.11
		R ₂	1441.0	351.0	1265.7	3057.7	0.12
		R ₃	1461.8	468.4	1270.9	3201.1	0.21
7	20×50	R ₁	1752.0	487.7	1530.2	3769.9	0.16
		R ₂	1782.9	417.7	1539.2	3739.8	0.18
		R ₃	1752.0	505.3	1548.9	3806.2	0.27
8	50×100	R ₁	3510.0	613.3	2813.3	4941.4	6.28
		R ₂	3555.0	545.1	2858.7	4790.4	6.55
		R ₃	3625.0	600.4	2823.1	4933.1	7.00
9	50×200	R ₁	6795.0	928.6	5102.6	12826.2	11.26
		R ₂	6765.0	913.2	5095.2	12773.4	11.52
		R ₃	6795.0	909.4	5102.6	12807.0	13.34
10	100×200	R ₁	6795.0	937.4	5103.1	12835.5	166.10
		R ₂	6840.0	879.3	5120.8	12840.1	163.78
		R ₃	6825.0	923.8	5138.0	12886.8	171.85
11	100×250	R ₁	8535.0	1086.6	6317.6	15939.2	300.00
		R ₂	8580.0	1092.5	6341.2	16013.7	310.64
		R ₃	8535.0	1068.9	6317.6	15921.5	311.56
12	100×300	R ₁	11038.5	1213.5	7630.6	19231.6	470.27
		R ₂	10556.3	1229.0	8290.3	20075.6	462.19
		R ₃	10350.0	1156.8	7608.4	19115.2	473.93
13	150×200	R ₁	6825.0	952.3	5153.3	12930.6	308.49
		R ₂	6825.0	897.6	5126.8	12849.4	315.93
		R ₃	6840.0	932.8	5167.9	12940.7	318.10
14	150×250	R ₁	8430.0	1142.5	6249.3	15821.8	432.09
		R ₂	8445.0	1000.0	6271.9	15717.8	434.39
		R ₃	8445.0	1100.9	6264.7	15810.6	446.21

문제에 대해서도 신속히 해를 구하였으므로 현실적인 문제의 해결에 유용하리라 예상된다.

參 考 文 獻

- [1] 이창호, 「상위 링 형태를 갖는 2계위 계층 구조의 망설계에 관한 연구」, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1993.
- [2] Balas, E., "The prize collecting traveling salesman problem", *Networks*, vol 19(1989), pp 621-636.
- [3] Current, J. R., "The design of a hierarchical transportation network with transshipment facilities", *Transportation Science*, vol 22(1988), pp 270-277.
- [4] Current, J. R., Revelle, C. S., and Cohon, J. L., "The hierarchical network design problem", *European Journal of Operational Research*, vol 27(1986), pp 57-66.
- [5] Current, J. R. and Schilling, D. A., "The covering salesman problem", *Transportation Science*, vol 23(1989), pp 208-213.
- [6] Domschke, W. and Drexl, A., "ADD-heuristics starting procedures for capacitated plant location models", *European Journal of Operational Research* Vol 21(1985), pp 47-53.
- [7] Gavish, B., "Topological design of centralized computer networks-formulations and algorithms", *Networks*, vol 12 (1982), pp 300-377.
- [8] Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. and Shmoys, D. B., edited, *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons, 1987.
- [9] Lee, C. H., Ro, H. B., and Tcha, D. W., "Topological Design of a Two-Level Network with Ring-Star Configuration", *Computers & Operations Research*, vol 20(1993), pp 625-637.
- [10] Magnanti, T. L. and Wong, R. T., "Network design and transportation planning model and algorithms", *Transportation Science*, vol 18(1984), pp 1-55.
- [11] Minoux, M., "Network synthesis and optimum network design problem: models, solution methods and applications", *Networks*, vol 19(1989), pp 313-360.
- [12] Norman, H. J. Van, *LAN/WAN Optimization Techniques*, Artech House, 1992.
- [13] Ong, H. L., "Approximate algorithm for the traveling purchaser problem", *OR Letters*, vol 1(1982), pp 201-205.
- [14] Pirkul, H., "Efficient algorithms for the capacitated concentrator location problem", *Computers & Operations Research*, vol 14, pp 197-208, 1987.
- [15] Pirkul, H., Narashimhan, S., and De, P., "Locating concentrators for primary and secondary coverage in a computer communications network", *IEEE Transactions on Communications*, vol

36, pp 450–458, 1988.

- [16] Vob, S., “Designing special communication networks with the traveling purchaser problem”, *Proceedings of the 1st ORSA Telecommunications SIG Conference*, Florida, March, pp 106–110, 1990.
- [17] Wu, T. H., *Fiber Network Service Survivability*, Artech House, 1992.