

# BcN 서비스 가입자 망 설계를 위한 타부서치 휴리스틱 알고리즘 개발

이영호<sup>1\*</sup> · 윤현정<sup>1</sup> · 이순석<sup>2</sup> · 박노익<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 정보경영공학부 / <sup>2</sup>한국전자통신연구원 광대역통합망연구단

## Tabu Search Heuristic Algorithm for Designing Broadband Convergence Networks

Youngho Lee<sup>1</sup> · Hyunjung Yun<sup>1</sup> · Sunsuk Lee<sup>2</sup> · Noik Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Information Management Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>2</sup>Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-700, Korea

In this paper, we deal with an access network design problem arising from the deployment of broadband convergence networks (BcN). The problem seeks to minimize the total cost of switch and cable while satisfying the requirement of demand and quality of service (QoS). We develop mixed integer programming models to obtain the optimal switch location of the access network. We develop a Tabu Search (TS) heuristic algorithm for finding a good feasible solution within a reasonable time limit. We propose real networks with up to 25 nodes and 180 demands. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm, we generate lower bounds from nonlinear QoS relaxation problem. Computational results show that the proposed heuristic algorithm provides upper bounds within 5% optimality gap in 10 seconds.

**Keywords:** Tabu Search, Converged Access Network Design, Quality of Service (QoS), Three-Level Capacitated Facility Location-Allocation Problem (CFLP)

### 1. 서론

이 논문은 광대역 융합 가입자 망 (Broadband Convergence Networks, BcN) 최적 설계를 위하여 타부서치 (Tabu Search, TS) 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. BcN은 통신, 방송, 그리고 인터넷이 통합된 서비스를 제공하면서 서비스 품질 (Quality of Service, QoS)를 만족시키는 멀티미디어 네트워크이다. BcN은 기존 가입자 망에 비해 유지와 보수비용이 낮고 가입자 보안 성능이 높은 반면, 광케이블과 장비 비용이 높아 망 구축에 따른 투자 위험이 크다. 따라서 망 구축에 따른 투자 위험을 줄이기 위하여 BcN은 광케이블과 장비 비용을 고려한 최적망 설계 연구가 필요하다. 이를 위해 망 설계 연구에서 망구조와 비용 요소를 분석하고, QoS 제약을 포함한 최적화 모형과 해법을 제시한다.

이 논문은 <Figure 1>과 같이 이더넷 기술을 기반으로 한 BcN 가입자 망 설계문제를 다룬다 (Zhao *et al.*, 2003). 이더넷 기술 기반 BcN 가입자 망은 <Figure 1(a)>와 같이 세 레벨 (Level) 트리 네트워크 구조를 가지며, 가정용 게이트웨이 (Residential Gateway, RG), 첫 번째 2계층 (Primary-L2, P-L2) 스위치와 두 번째 2계층 (Secondary-L2, S-L2) 스위치, 그리고 최종 액세스 서비스 노드 (Access-Edge Service Node, A-ESN)로 구성된다. RG는 가입자 맥내의 Hub 역할을 하는 장비로 컴퓨터, TV, 냉장고와 같은 가전에서 발생하는 트래픽을 스위치로 전송하거나 네트워크를 통해 맥내로 전송되는 트래픽을 가전으로 전송하는 장비이다. P-L2와 S-L2 스위치는 Layer-2 스위치로써 RG와 A-ESN 사이에 트래픽을 멀티플렉싱 (Multiplexing)/디멀티플렉싱 (Demultiplexing) 하는 장비이다. 그리고 이 두 스위치

\* 연락처 : 이영호, 136-701 서울시 성북구 안암동 5가 1 고려대학교 정보경영공학부, Tel : 02-3290-3390, Fax : 02-929-5888, E-mail : yhlee@korea.ac.kr

2008년 02월 접수; 2008년 04월 수정본 접수; 2008년 04월 게재 확정.

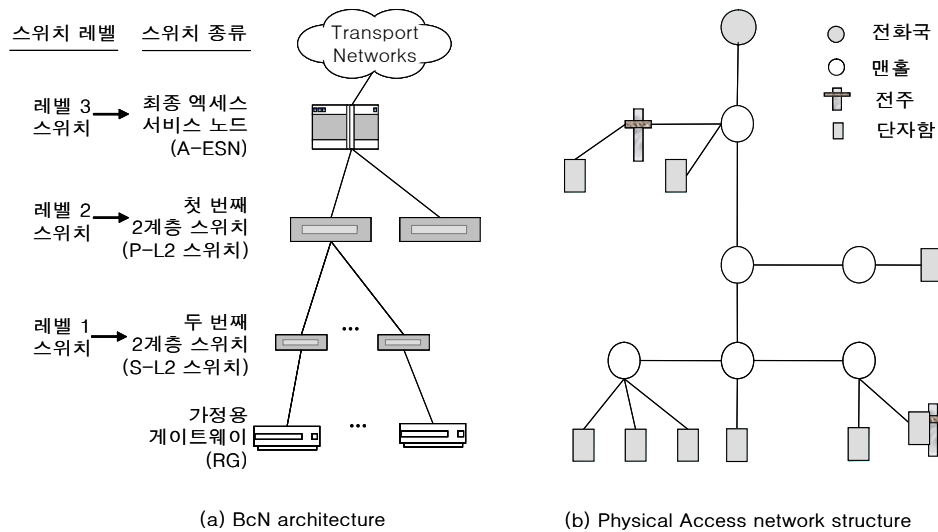


Figure 1. A conceptual view of BcN architecture

는 계층적 구조를 갖기 위한 구분일 뿐 용량 차이를 있으나 스위칭 기능은 다르지 않다. A-ESN은 전화국 (Central Office, CO)에 설치하며 인터넷 프로토콜 (Internet Protocol) 망과 가입자 망 사이에 트래픽을 전달하는 장비이다. BcN 비용요소는 BcN 가입자 망을 구성하는 세 가지 스위치와 스위치를 연결하는 케이블로 정한다. 그러므로 이 논문은 RG와 A-ESN 사이 스위치를 설치하고, 스위치 간 QoS를 만족하는 가입자 망 설계를 연구 범위로 한다.

BcN 설계 문제는 용량 제약이 있는 3단계 설비 위치 결정 문제 (Capacitated Facility Location Problem, CFLP)로 QoS 제약을 추가하여 정의한다. 이 논문에서 3단계 CFLP는 스위치 용량을 고려하여 스위치 설치 위치와 스위치 대수를 결정한다. 그리고 포트 (port)수는 스위치 별로 주어진다. 이 논문은 스위치별 포트 수가 정해진 상태에서 BcN 가입자 망 구조를 <Figure 1(b)>와 같은 기존 물리적 가입자 망 선로구조에 설치하는 문제를 다룬다. 기존 물리적 가입자 망 구조는 트리형태로 노드 (Node)와 링크 (Link)가 있는 네트워크 모형이고, 특히 CO를 Root 노드로 하는 기존 통신망 가입자 선로구조를 따른다. 이때 맨홀과 전신주 같이 스위치를 설치할 수 있는 곳을 노드로 하고, 노드 사이를 링크로 가정한다. 기존 선로구조에서 각 노드는 CO까지 유일한 경로 (Path)로 연결되고, 상위 스위치는 하위 스위치보다 상위 경로에 설치하여 연결된다. BcN 설계 문제에서 QoS 제약조건은 Erlang-B ( $E_B$ )와 Erlang-C ( $E_C$ )공식을 이용하여 비선형 QoS 제약식으로 표현된다. 따라서 BcN 설계 문제는 CFLP에 비선형 QoS 제약식을 추가한 비선형 혼합 정수 계획법으로 표현된다. 또한 CFLP는 NP-hard로 알려져 있다 (Leung and Magnauti (1989), Aardal (1998), Aardal, Pochet and Wolsey (1995), 그리고 Nemhauser and Wolsey (1988)). CFLP

특성과 비선형 제약식에 의해 실제 망 설계 문제에서 주어진 시간 내에 좋은 해를 구하기 어렵다. 그러므로 이 논문은 BcN 가입자 망 설계 문제의 특성을 이용하여 해를 찾는 TS 휴리스틱 알고리즘을 개발한다.

TS 휴리스틱 알고리즘 개발 이슈는 세 가지이다. 첫 번째, 복잡한 비선형 QoS 제약식에서  $E_B$ 와  $E_C$  공식을 효과적으로 다룰 수 있어야 한다. 두 번째, CFLP 망 설계 특성인 스위치와 케이블 비용 사이 상충관계 (Trade-Off)를 고려한 알고리즘 개발이 필요하다. 마지막으로 트리구조 가입자 망이라는 특성을 이용해야 한다. 가입자 망 선로구조는 트리 형태이기 때문에 각 가입자 노드에서 연결될 수 있는 스위치 후보지가 한정되어 있다. 즉, 가입자 노드에서 CO까지 단일경로가 존재하고 가입자 노드에서 연결될 수 있는 스위치 후보지는 그 경로 위에 있어야 한다. 가입자 노드부터 CO까지 경로에서 특정 후보지에 연결하는 케이블 비용은 경로에 포함된 링크 거리에 비례한다. 따라서 일반적인 CFLP 문제와 달리 트리구조 가입자 망을 활용하므로 TS 휴리스틱 알고리즘 성능을 향상시킬 수 있다.

장비의 위치, 용량, 그리고 연결 관계를 고려하면서 비용이나 시간을 최소화 하는 문제를 풀기 위하여 기존 연구는 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. Lee *et al.* (2006)은 케이블 비용을 고려하지 않고 스위치 종류가 결정된 조건에서 최적 망 설계를 위하여 로컬서치 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 그러나 가입자 망 설계에서 Lee *et al.* (2006)은 기존 통신망 선로구조를 이용한 연구로 확장되지 못하여 실제 망 투자 의사결정 시 이용하기 어렵다. Carello *et al.* (2004)과 Dlek and Laura (1998)는 실제 장비 위치를 고려한 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. Carello *et al.* (2004)은 Two-Level Network를 계획하는

문제에 로컬서치 휴리스틱 알고리즘을 적용하였고, Dlek and Laura (1998)는 Location Routing 문제에 Two-Phase TS 휴리스틱 알고리즘을 적용하였다. 하지만 Carello *et al.* (2004)은 위치 결정과 노드 할당을 서로 다른 문제로 나누어 고려하므로 비경제적인 망을 찾는 한계가 있다.

그리고 Girard *et al.* (2001), Gendron, Potrin, and Soriano (2003), 그리고 Ghiani *et al.* (2004)은 장비 용량과 연결제약을 고려한 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. Girard *et al.* (2001)은 스위치 용량제약과 연결제약이 있는 가입자 망 설계문제에 TS 휴리스틱 알고리즘을 적용하였지만 스위치 간 상하 관계를 고려하지 않았다. Gendron, Potrin, and Soriano (2003)는 용량제약이 있는 다품종 설비 입지 선정문제에서 총 운영비용을 최소화 하는 TS 휴리스틱 알고리즘을 개발하고, Ghiani *et al.* (2004)은 용량제약과 연결제약이 있는 아크 라우팅 문제 (Arc Routing Problem)에서 노드 간 횡단시간 (Traverse Time)을 최소화 하는 TS 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 하지만 두 논문은 수요 제약을 고려하지 못한 한계가 있다.

장비 위치와 비용 최적화 문제를 풀기 위하여 Ghiani *et al.* (2004)과 Laguna *et al.* (1995)은 용량을 고려한 다단계 할당 문제에 TS 휴리스틱 알고리즘을 적용하였다. 두 논문에서 적용한 이동 조합은 링크 삭제, 추가 이동, 노드에 장비 설치, 삭제 이동, 그리고 경로 분할과 통합 이동으로 망 설계 문제에 적용하는데 효과적이다. Rochat and Taillard (1995)는 차량 경로 문제에서 원 문제를 하위문제로 나누어 지역해를 구하고, 지역해를 향상시키기 위해 이동 조건을 수정하는 장기 메모리 기법을 이용하였다. 이 장기 메모리 기법은 BcN 설계 시 새로운 해 영역을 탐색하는 기법으로 응용할 수 있다.

기존 망 설계 논문 중 휴리스틱 알고리즘을 적용한 논문에서 제시한 해 탐색 기법은 이 논문에 응용이 가능하다. 하지만 위에서 언급한 논문은 비경제적인 해를 찾거나 수요제약을 고려하지 않는 두 가지 한계가 있다. 특히 QoS 제약과 노드 간 연결 케이블 비용을 동시에 고려하는 물리적 가입자 망을 설계하지 못하였다. 따라서 이 논문은 총 비용을 최소화 하면서 물리적 가입자 망에 적용 가능한 TS 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 그리고 TS 휴리스틱 알고리즘 결과는 비선형 QoS 제약식을 선형으로 완화하여 구한 해와 비교한다.

이 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서 BcN 설계를 위한 혼합 정수 계획법 모델을 제시한다. 제 3장은 개발한 최적화 모형을 풀기 위하여 TS 휴리스틱 알고리즘을 제시한다. 그리고 제 4장은 TS를 이용하여 구한 결과를 QoS 선형 완화 해와 비교하고, 끝으로 제 5장에서 결론과 향후 연구 과제를 기술한다.

## 2. BcN 설계 최적화 모형

### 2.1 집합과 모수

- $N$  : 가입자 망 선로구조에서 스위치를 설치할 수 있는 후보노드 집합,
- $M$  : 가입자 노드 집합,
- $cs_{ij}$  : 가입자 노드  $i \in M$  에 연결한 가입자와 노드  $j$  에 설치한 S-L2 스위치 사이 케이블 비용,
- $cp_{jk}$  : 노드  $j$  에 설치한 S-L2 스위치와 노드  $k$  에 설치한 P-L2 스위치 사이 케이블 비용,
- $ca_k$  : 노드  $k$  에 설치한 P-L2 스위치와 CO에 설치한 A-ESN 사이 케이블 비용,
- $fs_j$  : 노드  $j$  에서 S-L2 스위치 한 대를 설치할 때 드는 비용,
- $fp_k$  : 노드  $k$  에서 P-L2 스위치 한 대를 설치할 때 드는 비용,
- $fa$  : CO에 A-ESN 한 대를 설치할 때 드는 비용,
- $ns_j$  : 노드  $j$  에 설치할 수 있는 S-L2 스위치 최대 대수,
- $np_k$  : 노드  $k$  에 설치할 수 있는 P-L2 스위치 최대 대수,
- $na$  : CO에 설치할 수 있는 A-ESN 최대 대수,
- $d_i$  : 가입자 노드  $i \in M$  에 연결한 가입자 수,
- $\epsilon_s$  : Stream 서비스  $s$  의 블로킹 확률 상한 ( $0 < \epsilon_s < 1$ ),
- $\delta_s$  : Elastic 서비스  $s$  의 전송지연률 상한 ( $\delta_s > 1$ ),
- $A_s$  : 서비스  $s$  가 발생시키는 트래픽강도,
- $r_s$  : 전송 속도 (Access Bit Rate, Mbps),
- $\alpha, \beta, \gamma$  : S-L2, P-L2 스위치, 그리고 A-ESN 포트 수,
- $CS, CP, CA$  : S-L2, P-L2 스위치, 그리고 A-ESN 용량 (Mbps).

### 2.2 결정변수

- $x_{ijp}$  : 가입자 노드  $i \in M$  에 연결한 가입자 중 노드  $j$  에 설치한  $p$  번째 S-L2 스위치와 연결된 가입자 수,
- $zs_{jkpq}$  : 노드  $j$  에 설치한  $p$  번째 S-L2 스위치가 노드  $k$  에 설치한  $q$  번째 P-L2 스위치에 연결되면 1, 그렇지 않으면 0,
- $zp_{klq}$  : 노드  $k$  에 설치한  $q$  번째 P-L2 스위치가 CO에 설치한  $l$  번째 A-ESN에 연결되면 1, 그렇지 않으면 0,
- $za_l$  : CO에  $l$  번째 A-ESN이 설치하면 1, 그렇지 않으면 0,
- $F_s(x_{ijp}, zs_{jkpq}, zp_{klq}, za_l)$  : 가입자 노드  $i \in M$  에 연결한 가입자가 노드  $j$  에 설치한  $p$  번째 S-L2 스위치, 노드  $k$  에 설치한  $q$  번째 P-L2 스위치, 그리고 CO에 설치한  $l$  번째 A-ESN에 연결한 경우 Stream 서비스  $s$  의 중단간 블로킹 확률,
- $G_s(x_{ijp}, zs_{jkpq}, zp_{klq}, za_l)$  : 가입자 노드  $i \in M$  에 연결한 가입자가

노드  $j$  에 설치한  $p$  번째 S-L2 스위치, 노드  $k$  에 설치한  $q$  번째 P-L2 스위치, 그리고 CO에 설치한  $l$  번째 A-ESN에 연결한 경우 Elastic 서비스  $s$  의 중단간 전송지연률,

$BS_{jps}$  : 노드  $j$  에 설치한  $p$  번째 S-L2 스위치에서 Stream 서비스  $s$  의 블로킹 확률,

$BP_{kqs}$  : 노드  $k$  에 설치한  $q$  번째 P-L2 스위치에서 Stream 서비스  $s$  의 블로킹 확률,

$BA_{ls}$  :  $l$  번째 A-ESN에서 Stream 서비스  $s$  의 블로킹 확률,

$DS_{jps}$  : 노드  $j$  에 설치한  $p$  번째 S-L2 스위치에서 Elastic 서비스  $s$  의 전송지연률,

$DP_{kqs}$  : 노드  $k$  에 설치한  $q$  번째 P-L2 스위치에서 Elastic 서비스  $s$  의 전송지연률,

$DA_{ls}$  :  $l$  번째 A-ESN에서 Elastic 서비스  $s$  의 전송지연률,

$us_s, up_s, ua_s$  : S-L2, P-L2 스위치, 그리고 A-ESN에서 서비스  $s$  에 할당된 대역폭 비율.

### 2.3 망 설계 최적화 모형

BcN 설계 문제에서 최적화 모형은 총비용 최소를 목적식으로 한다. 총비용은 스위치 비용과 가입자에서 S-L2, S-L2에서 P-L2, 그리고 P-L2에서 A-ESN을 연결하는 케이블 비용 합이다. 이 논문에서 총 비용을 최소로 하는 가입자 망 설계 최적화 모형은 BCNP라 부르고, 모형은 다음과 같다.

**BCNP:**

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} \sum_{p=1}^{ns_j} cs_{ij} x_{ijp} + \sum_{j \in N} \sum_{p=1}^{ns_j} \sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} (fs_j + cp_{jk}) zs_{jkpq} \\ & + \sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} \sum_{l=1}^{na} (fp_k + ca_k) zp_{klq} + \sum_{l=1}^{na} fa \cdot za_l \end{aligned} \quad (1)$$

*Subject to*

$$\sum_{j \in N} \sum_{p=1}^{ns_j} x_{ijp} = d_i, \quad \forall i \in M, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} zs_{jkpq} \leq I, \quad \forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^{na} zp_{klq} \leq I, \quad \forall k \in N, q = 1, \dots, np_k, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ijp} \leq \alpha \sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} zs_{jkpq}, \quad \forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, \quad (5)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} zs_{jkpq} \leq \beta \sum_{l=1}^{na} zp_{klq}, \quad \forall k \in N, q = 1, \dots, np_k, \quad (6)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} zp_{klq} \leq \gamma \cdot za_l, \quad \forall l = 1, \dots, na, \quad (7)$$

$$F_s(x_{ijp}, zs_{jkpq}, zp_{klq}, za_l) \leq \varepsilon_s,$$

$$\forall i \in M, j \in N, p = 1, \dots, ns_j, k \in N, q = 1, \dots, np_k,$$

$$l = 1, \dots, na, s \in S_{stream}, \quad (8)$$

$$G_s(x_{ijp}, zs_{jkpq}, zp_{klq}, za_l) \leq \delta_s,$$

$$\forall i \in M, j \in N, p = 1, \dots, ns_j, k \in N, q = 1, \dots, np_k,$$

$$l = 1, \dots, na, s \in S_{elastic}, \quad (9)$$

$$x_{ijp} \geq 0, \text{ and integer}, \quad \forall i \in M, j \in N, p = 1, \dots, ns_j,$$

$$zs_{jkpq}, zp_{klq}, za_l \in \{0, 1\},$$

$$\forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, k \in N, q = 1, \dots, np_k, l = 1, \dots, na.$$

BCNP 모형에서 식 (1)은 스위치 비용과 케이블 비용을 최소로 한다. 식 (2)부터 식 (7)은 스위치 설치 제약식과 스위치 연결 제약식이다. 식 (2)는 가입자를 S-L2 스위치에 연결하는 수요 충족제약을 나타낸다. 가입자 망에 하위 스위치는 상위 스위치에 연결해야 하므로 식 (3)과 식 (4)와 같은 스위치 할당 제약조건이 필요하다. 식 (5)에서 식 (7)은 스위치 포트 수 제약조건을 나타낸다. 포트 수 제약조건은 S-L2 스위치를 설치해야 가입자가 연결되는 스위치 설치 제약이다. 그리고 하위 스위치는 상위 스위치가 설치되어야 연결할 수 있다. 이 때 최대 연결 가능한 가입자 수 또는 하위 스위치 대수는 상위 스위치 포트 수보다 작다.

다음 식 (8)과 식 (9)는 트래픽 클래스 별 QoS 제약식이다. 식 (8)은 Stream 트래픽 중단간 QoS를 계산하는 함수이고, 식 (9)는 Elastic 트래픽 중단간 QoS를 계산하는 함수이다. 식 (10)부터 식 (16)은 Stream 트래픽 QoS 제약식으로 이 논문에서  $E_B$  공식을 이용하여 구한다. Stream 트래픽에서 블로킹 확률은 가입자에서 A-ESN까지 보낸 링크 중 연결되지 않은 링크 비율로 정의한다.  $E_B$  공식에서 트래픽 강도 (Traffic Intensity)를  $A$ , 채널의 수를  $Q$ 라 하면 블로킹 확률은 다음과 같다.

$$E_B(A, Q) = \frac{A^Q / Q!}{\sum_{i=0}^Q A^i / i!}.$$

스위치 별 트래픽 강도는 식 (10)부터 식 (13)에서 나타낸다. 식 (10)에서  $SL2TI$ 는 노드  $j$  에 설치한  $p$  번째 S-L2 스위치와 연결한 가입자 수를 고려하여 계산하고, 식 (11)과 식 (12)에서  $PL2TI$ 와  $AESNTI$ 는 각 하위 스위치에서 블로킹된 호 비율을 제외하고 트래픽 강도를 계산한다. 또한 식 (13)에서 채널수는 노드  $j$  에 설치한  $p$  번째 S-L2 스위치가 노드  $k$  에 설치한  $q$  번째 P-L2 스위치에 연결한 경우 서비스  $s$  가 이용하는 서버 수로 정의한다. 식 (13)부터 식 (15)는 스위치 별 트래픽 강도와 채널수를 이용한 스위치 별 블로킹 확률을 나타낸다. 그리고

식 (16)에서 중단간 블로킹 확률은 상위 스위치 제공로드가 하위 스위치에 블로킹되지 않는 정도로 정의한다.

$$SL2TI_{jps} = \sum_{i \in M} x_{ijp} A_s, \quad \forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, s \in S_{stream}, \quad (10)$$

$$PL2TI_{kqs} = \sum_{j \in N} \sum_{p=1}^{ns_j} SL2TI_{jps} \cdot z_{jkpq} (1 - BS_{jps}), \quad \forall k \in N, q = 1, \dots, np_k, s \in S_{stream}, \quad (11)$$

$$AESNTI_{ls} = \sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} PL2TI_{kqs} \cdot z_{pkql} (1 - BP_{kqs}), \quad \forall l = 1, \dots, na, s \in S_{stream}, \quad (12)$$

$$BS_{jps} = E_B \left( SL2TI_{jps}, \sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} CS \cdot us_s \cdot z_{jkpq} / r_s \right), \quad \forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, s \in S_{stream}, \quad (13)$$

$$BP_{kqs} = E_B \left( PL2TI_{kqs}, \sum_{l=1}^{na} CP \cdot up_s \cdot z_{pkql} / r_s \right), \quad \forall k \in N, q = 1, \dots, np_k, s \in S_{stream}, \quad (14)$$

$$BA_{ls} = E_B (AESNTI_{ls}, CA \cdot ua_s \cdot za_l / r_s), \quad \forall l = 1, \dots, na, s \in S_{stream}, \quad (15)$$

$$1 - (1 - BS_{jps}) (1 - BP_{kqs}) (1 - BA_{ls}) \leq \varepsilon_s, \quad \forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, k \in N, q = 1, \dots, np_k, l = 1, \dots, na, s \in S_{stream}. \quad (16)$$

그리고 식 (17)부터 식 (23)은 Elastic 트래픽 QoS 제약식으로  $E_C$  공식을 이용하여 구한다. Elastic 트래픽에서 전송지연률은 평균 파일 전송시간 또는 평균 처리량 (Throughput)이 채워지는 정도로 정의한다.  $E_C$  공식에서 트래픽 강도를  $A$ , 채널수를  $Q$  라 하면 전송지연율  $D$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$D = 1 + \frac{E_C(A, Q)}{Q - A}.$$

이 때  $E_C$  공식은 다음과 같다.

$$E_C(A, Q) = \frac{\frac{A^Q}{Q!}}{\sum_{i=0}^{Q-1} \frac{A^i}{i!} + \frac{A^Q}{Q!} \cdot \frac{Q}{(Q-A)}}.$$

식 (17)부터 식 (19)와 같이 스위치 별 Elastic 트래픽 강도는 스위치에 연결한 하위 스위치 트래픽 강도에 영향을 받는다. 그리고 식 (20)부터 식 (22)는 스위치 별 전송지연율을 나타내

고, 채널수는 Stream 트래픽의 채널수와 동일하게 계산한다. 식 (23)과 같이 Elastic 트래픽 중단간 QoS 제약 ( $\delta_s$ )은 스위치 별 전송지연률 중 최대 전송지연률을 만족하도록 정한다 (Riedl, 2004).

$$SL2TI_{jps} = \sum_{i \in M} x_{ijp} A_s, \quad \forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, s \in S_{elastic}, \quad (17)$$

$$PL2TI_{kqs} = \sum_{j \in N} \sum_{p=1}^{ns_j} SL2TI_{jps} \cdot z_{jkpq}, \quad \forall k \in N, q = 1, \dots, np_k, s \in S_{elastic}, \quad (18)$$

$$AESNTI_{ls} = \sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} PL2TI_{kqs} \cdot z_{pkql}, \quad \forall l = 1, \dots, na, s \in S_{elastic}, \quad (19)$$

$$DS_{jps} = 1 + \frac{E_C \left( SL2TI_{jps}, \sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} CS \cdot us_s \cdot z_{jkpq} / r_s \right)}{\sum_{k \in N} \sum_{q=1}^{np_k} CS \cdot us_s \cdot z_{jkpq} / r_s - SL2TI_{jps}}, \quad \forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, s \in S_{elastic}, \quad (20)$$

$$DP_{kqs} = 1 + \frac{E_C \left( PL2TI_{kqs}, \sum_{l=1}^{na} CP \cdot up_s \cdot z_{pkql} / r_s \right)}{\sum_{l=1}^{na} CP \cdot up_s \cdot z_{pkql} / r_s - PL2TI_{kqs}}, \quad \forall k \in N, q = 1, \dots, np_k, s \in S_{elastic}, \quad (21)$$

$$DA_{ls} = 1 + \frac{E_C (AESNTI_{ls}, CA \cdot ua_s \cdot za_l / r_s)}{CA \cdot ua_s \cdot za_l / r_s - AESNTI_{ls}}, \quad \forall l = 1, \dots, na, s \in S_{elastic}, \quad (22)$$

$$DS_{jps} \leq \delta_s, DP_{kqs} \leq \delta_s, DA_{ls} \leq \delta_s, \quad \forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, k \in N, q = 1, \dots, np_k, l = 1, \dots, na, s \in S_{elastic}. \quad (23)$$

BCNP 모형에서 중단간 QoS 제약식은 비선형 제약식으로 상용 패키지 CPLEX를 이용하여 해를 구할 수 없다. 따라서 Kim (2007)은 비선형 제약식을 선형으로 완화하여 QoS 선형 완화 문제를 정의하였다. 식 (16)과 같은 중단간 블로킹 확률식은 식 (24)와 같이 스위치 별 블로킹 확률식으로 완화할 수 있다.

$$BS_{jps} \leq \varepsilon_s, BP_{kqs} \leq \varepsilon_s, BA_{ls} \leq \varepsilon_s, \quad \forall j \in N, p = 1, \dots, ns_j, k \in N, q = 1, \dots, np_k, l = 1, \dots, na, s \in S_{stream}. \quad (24)$$

Stream 트래픽의 완화된 중단간 QoS 제약식과 Elastic 트래

픽 종단간 QoS 제약식에서 스위치 별 최소 대역폭 요구량을 알면 QoS 제약식은 용량 제약식으로 표현된다. 스위치 별 연결 가능한 최대 가입자 수를 이용하여 용량 제약식을 가입자 수 제약식으로 나타낸다. 이때 연결 가능 최대 가입자 수는 완화문제 상한 (Upper Bound, UB)으로, 그리고 완화문제를 풀어 얻은 해는 선형 완화해로 정의한다. 선형 완화해는 망 설계 문제 하한 (Lower Bound, LB)으로 제 4장에서 TS 휴리스틱 알고리즘 결과와 비교한다.

위에서 제시한 완화 문제 결과는 TS 결과의 비교대안으로 활용할 수 있지만 종단간 QoS를 보장하는 해를 구하기 어렵다. 왜냐하면 실제 망 설계 문제는 비용 요소와 불확실한 트래픽을 고려하여 다양한 시나리오로 구성되기 때문이다. 따라서 이 논문은 망 설계 문제 특성을 이용하고, 제한 시간 내에 좋은 해를 찾는 TS 휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

### 3. 타부서치 (Tabu Search, TS)

휴리스틱 알고리즘 중 TS는 트리구조 망 특성을 이용하여 해를 탐색하는 알고리즘이다. 또한 TS는 이동 (Move)과 이웃해 (Neighborhood)를 정의하고, 타부메모리를 이용하여 탐색하지 않은 지역에서 해를 찾도록 유도하기 때문에 지역해 (Local Optimum)를 벗어나 최적해 (Global Optimum)를 구할 수 있다. TS 휴리스틱 알고리즘은 초기해 과정, 단기 메모리 과정, 그리고 장기 메모리 과정의 세 가지 세부 절차로 이루어진다.

#### 3.1 초기해 과정

망에 서비스가 가능하도록 스위치를 가입자 노드에 최대한 가깝게 설치하여 초기해를 구한다. 가입자에게 서비스를 제공하기 위해 필요한 스위치 대수를 결정하고, 스위치 최소 대수 ( $max\_SL2$ ,  $max\_PL2$ ,  $max\_AESN$ )로 정의한다. 스위치 최소 대수를 용량, 포트 수, 그리고 종단간 QoS 제약을 만족하도록 설정한다. 특히 S-L2 스위치 한 대에서 서비스 받을 수 있는 가입자 수 ( $SL2\_Max\_NS$ )를 결정한 후, 전체 가입자를  $SL2\_Max\_NS$ 로 나누어 올린 값으로  $max\_SL2$ 를 정한다. 결정된 스위치 최소 대수를 S-L2, P-L2 스위치, 그리고 A-ESN 순으로 CO에 설치하고, 가입자 노드에 가깝게 스위치를 이동시킨다. 이때 가입자 노드에 가깝게 스위치를 하위 노드로 이동하면서 케이블 비용을 줄이는 방법을 스위치 탑다운 (Top-Down) 방식으로 정의한다. 스위치가 더 이상 하위 노드로 이동할 수 없는 경우 스위치 탑다운 방식을 마치고, 종단간 QoS 만족 여부를 확인한다. 만약 탑다운 방식으로 구한 해가 종단간 QoS를 만족하

지 않으면  $SL2\_Max\_NS$ 를 줄이고, 스위치 최소 대수를 다시 계산하여 탑다운 방식으로 해를 구한다.  $SL2\_Max\_NS$ 를 줄이는 이유는 가입자 수 제약에 따라 종단간 QoS 만족 여부가 결정되기 때문이다. 종단간 QoS를 만족할 때까지 위 과정을 반복하고, 종단간 QoS를 만족하면 초기해 과정을 끝낸다. 초기해 과정에서 구한 해를 TS 휴리스틱 알고리즘 단기 메모리 과정에서 시작해로 이용한다.

#### 3.2 단기 메모리 과정

단기 메모리 과정은 정의한 이동과 이웃해 평가 방법을 이용하여 초기해에서 시작하여 새로운 해를 찾는 단계이다. 이 논문에서 이동은 트리구조 망 특성을 반영한 스위치 위치 이동과 케이블 연결 관계 이동으로 정의한다. 또한 평가함수 값 (Evaluation Function Value, EV)이 최소인 해를 이웃해로 선정하고, 타부는 이동하는 스위치 종류와 스위치 이동 위치로 정의한다.

##### 3.2.1 이동과 이웃해

이동은 스위치 위치 이동과 케이블 연결 관계 이동으로 정의한다. 이웃해는 이동으로 생성된 해로 정의하고, 그 중 EV가 최소인 해를 현재 반복구간 (Iteration)의 최선 이웃해 (Best Neighborhood Solution)로 정의한다.

스위치 위치 이동은 S-L2와 P-L2 스위치 Slide-Up과 Slide-Down 이동으로 스위치 설치 위치를 옮겨 스위치 간 연결 관계를 바꾼다. 이웃해를 생성하기 위하여 Slide-Up 이동은 S-L2나 P-L2 스위치가 설치된 노드보다 상위 노드를 찾고, Slide-Down 이동은 하위 노드를 찾는다. 특히 기존 트리구조 망에서 스위치 설치 위치를 바꾸므로 새로운 망을 탐색하기 위해 스위치 위치 이동이 필요하다. 케이블 연결 관계 이동은 가입자와 S-L2 스위치 사이 또는 S-L2와 P-L2 스위치 사이 케이블 Transfer 이동으로 정의한다. 가입자와 S-L2 스위치 사이 케이블 Transfer는 가입자가 연결된 S-L2 스위치를 새로운 S-L2 스위치로 바꾸어 스위치에 할당된 가입자 수를 바꾸는 이동이다. 그리고 S-L2와 P-L2 스위치 사이 케이블 Transfer는 S-L2 스위치를 새로운 P-L2 스위치에 연결하는 이동이다. 케이블 Transfer 이동은 스위치 사이 상하 관계를 유지하면서 이웃해를 생성한다.

이웃해 중 EV가 최소인 해를 최선 이웃해로 정하고, 이때 이용한 이동을 최선 이동 (Best Move)으로 한다. 또한 이동으로 생성된 이웃해를 평가하기 위해 평가함수 (Evaluation Function, EF)를 정의한다. 다음은 이웃해 평가 방법이다.

##### 3.2.2 이웃해 평가 (Evaluation)

이동으로 생성된 이웃해는 총비용에 페널티 (Penalty)를 적

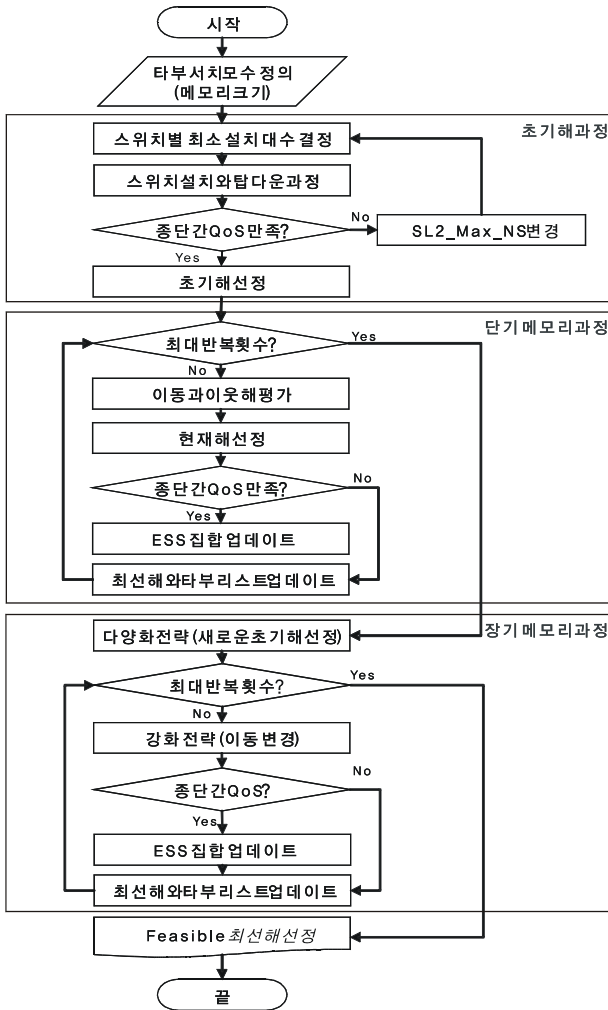


Figure 2. Tabu search flowchart

용하여 비교 평가한다. 페널티는 종단간 QoS 제약조건을 만족하는 정도에 따른 영향을 나타낸다. 특히 S-L2 스위치에 연결된 최대 가입자 수 ( $max\_RG$ )를 이웃해 평가를 위한 페널티로 적용한다. 가입자 수 제약조건을 만족하더라도 스위치에 연결된 가입자 수가 많을수록 종단간 QoS를 만족하지 못하는 경우가 발생하기 때문이다.  $max\_RG$ 가 작을수록 EV가 작으므로 최선 이웃해로 선정되거나 종단간 QoS를 만족시킬 가능성이 높다. 이웃해 평가함수 (EF)는 식 (25)와 식 (26)과 같이 나타내고, 이때 사용하는 용어는 다음과 같다.

- $EF_t$  : 단기와 장기 메모리 과정 총 횟수  $T$  중  $t \in T$  번째 EV,
- $Obj_t$  : 단기와 장기 메모리 과정 총 횟수  $T$  중  $t \in T$  번째 총 비용,
- $ZS_{jp}$  : 노드  $j$  에 설치한  $p$  번째 S-L2 스위치에 연결한 가입자 수,
- $Num\_SL2$  :  $max\_RG$  만큼 연결된 S-L2 스위치 수.

$$max\_RG = \max_{j,p} \left\{ ZS_{jp} \mid ZS_{jp} = \sum_{i \in M} x_{ijp}, \forall j, p \right\}, \quad (25)$$

$$EF_t = Obj_t + (Penalty),$$

$$= Obj_t + (max\_RG \times Num\_SL2), \forall t \in T. \quad (26)$$

### 3.2.3 타부와 타부리스트

TS에서 타부를 이동 속성 중 스위치 종류, 스위치 이동 전후 위치, 그리고 이동 종류로 정의한다. 기존 연구와 실험 경험을 바탕으로 타부리스트 크기 (Tabu Tenure)를 결정한다. 이 논문에서 종료조건 횟수는 단기 메모리 과정에서 100, 그리고 장기 메모리 과정에서 100이고, 타부리스트 크기는 20이다.

### 3.3 장기 메모리 과정

장기 메모리 과정은 탐색하지 않은 해 영역을 탐색하는 강화전략 (Intensification)을 제안한다. 이 논문에서 강화전략은 새로운 초기해를 시작으로 정한 뒤 스위치를 추가하거나 삭제하여 방문하지 못한 해 (Unvisited Solution)를 찾는 방법이다. 장기 메모리 과정에서 초기해는 단기 메모리 과정의 최선해에서 스위치 위치 정보를 저장한 뒤 가입자를 스위치에 균등 배분하여 구한다. 그리고 강화전략에서 이웃해는 S-L2와 P-L2 스위치 이동으로 인한 스위치 대수 변화와 가입자와 스위치 간 연결 관계 변화로 평가한다. 스위치가 추가되거나 삭제되는 경우 임의의 노드에 설치된 S-L2 스위치에 가입자를, 그리고 상위 스위치에 하위 스위치를 균등하게 연결하는 과정을 재할당 절차로 정한다. 재할당 절차로 생성된 최선해가 종단간 QoS를 만족하는 경우 장기 메모리 과정을 마친다.

### 3.4. TS 종료 조건

TS 휴리스틱 알고리즘은 종단간 QoS 제약과 횟수 제약을 만족하는 경우 종료한다. 초기해 과정에서 종단간 QoS 제약을 만족하는 해를 선정 후 종료한다. 그리고 단기와 장기 메모리 과정은 지정 횟수만큼 이동한 후 종료한다. 단기와 장기 메모리 과정에서 선정된 최선 이웃해가 종단간 QoS를 만족하는 경우 엘리트 해 집합 (Elite Solution Set, ESS)에 총비용이 최소인 순으로 해를 저장한다. 하지만 종단간 QoS를 만족하지 않는 경우 타부리스트에 이동 속성만 저장한다. 장기 메모리 과정이 끝나면 ESS에 저장된 해를 최선해 (Best Solution)로 선정하고 TS 휴리스틱 알고리즘을 종료한다. 지금까지 설명한 TS 휴리스틱 알고리즘 절차를 정리하면 <Figure 2>와 같다.

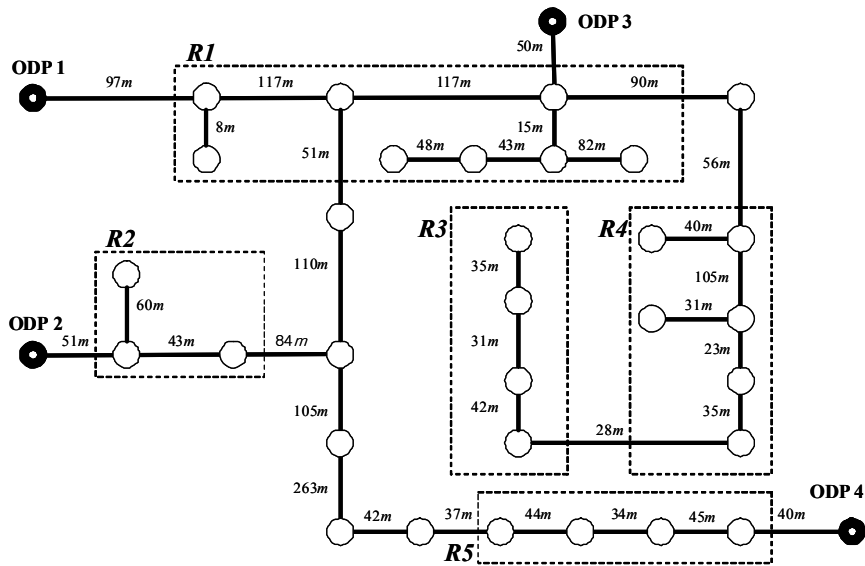


Figure 3. Test instances from real networks in Seoul

#### 4. 타부서치 결과

##### 4.1 실험 데이터와 비교 대안

개발한 휴리스틱 알고리즘 성능을 실험하기 위해 기본 가입자 망 선로구조, 스위치 용량과 비용, 케이블 비용, 트래픽 파라미터, 그리고 해 비교 방법을 정의한다. 이 논문에서 기본 가입자 망 선로구조는 <Figure 3>과 같이 실제 서울지역 물리적 가입자 망이다. 물리적 가입자 망은 노드수와 가입자 수 변화에 따라 5가지 지역모형을 제안한다. 실제 지역모형에서 노드 수는 19~25개이고, 가입자 수는 117~180이다.

<Table 1>은 스위치 용량과 비용, 그리고 케이블 비용으로 레벨 별 스위치 입력 데이터를 나타낸다. 스위치 용량이 결정되면 3.1절 초기해 과정처럼 스위치 별 연결 가능 최대 가입자 수를 계산할 수 있다. 스위치 용량이 <Table 1>과 같이 주어지면 스위치 별 연결 가능 가입자 수는 S-L2 스위치 19 (SL2\_Max\_NS), P-L2 스위치 122 (PL2\_Max\_NS), 그리고 A-ESN 262 (AESN\_Max\_NS)이다. 그리고 가입자 망 선로구조에서 포트

수는 스위치 별로 주어진다. S-L2 스위치 포트 수는 S-L2 스위치 대수와 상위 스위치 간 연결 관계에 변화를 주며 가입자와 직접 연결되므로 다른 스위치에 비해 총비용과 종단간 QoS에 영향이 크다. 따라서 이 논문은 S-L2 스위치 포트 수를 S-L2 스위치 연결 가능 최대 가입자 수 (SL2\_Max\_NS)보다 작은 경우 (16)와 큰 경우 (24)로 나누어 S-L2 스위치 포트 수가 총비용과 종단간 QoS에 주는 변화를 비교한다. 그리고 P-L2 스위치 포트 수와 A-ESN 포트 수는 (4, 2), (8, 4), 그리고 (12, 8) 세 가지 경우로 각 스위치와 연결 가능한 하위 스위치 대수와 가입자 수를 결정하는데 영향을 준다. 모든 가입자 망 선로구조에서 케이블 비용은 거리에 비례한다고 가정한다.

Table 1. Switch cost, switch capacity, and cable cost

	S-L2 스위치	P-L2 스위치	A-ESN
스위치용량 (Mbps)	80	280	500
스위치비용 (백만원)	100	300	500
케이블비용 (백만원/Meter)	0.1	0.5	1.0

Table 2. Service classes and traffic parameters

서비스 클래스		ABR	BHCA	FS or CD	QoS Limit
Stream 트래픽	Spech	0.064	0.000556	360	0.01
	High interactive multimedia	6	0.000278	360	0.01
	Multimedia	10	0.000014	5400	0.02
Elastic 트래픽	Messaging	0.01	1	0.01	1.01
	Switched data	1	0.1	1	1.1

1) For stream service, it represents call duration (CD, Seconds) and for elastic service, file size (FS, Mbytes)



**Table 3.** Test result ( $a=16, \beta=4, \gamma=2$ )

Problem	No. of Node	No. of Subs	Z_LB	Z_TS	GAP	T_TS	LB_QoS
R1	19	117	2874.3	2874.3	0.0%	1.1	O
R2	19	159	3683.7	3831.3	4.0%	1.5	O
R3	21	159	3372.3	3387.8	0.5%	1.8	O
R4	21	180	3830.4	3830.4	0.0%	2.1	O
R5	25	154	3408.6	3408.6	0.0%	2.4	O

**Table 4.** Test result ( $a=16, \beta=8, \gamma=4$ )

Problem	No. of Node	No. of Subs	Z_LB	Z_TS	GAP	T_TS	LB_QoS
R1	19	117	2793.3	2831.3	1.4%	1.4	X
R2	19	159	2832.7	2980.7	5.2%	1.5	X
R3	21	159	2552.8	2552.8	0.0%	1.8	O
R4	21	180	3017.9	3017.9	0.0%	2.3	O
R5	25	154	2597.6	2597.6	0.0%	2.4	O

**Table 5.** Test result ( $a=16, \beta=12, \gamma=8$ )

Problem	No. of Node	No. of Subs	Z_LB	Z_TS	GAP	T_TS	LB_QoS
R1	19	117	2793.3	2831.3	1.4%	1.4	X
R2	19	159	2843.1	2980.7	4.8%	1.5	X
R3	21	159	2552.8	2552.8	0.0%	1.8	O
R4	21	180	3017.9	3017.9	0.0%	2.3	O
R5	25	154	2597.6	2597.6	0.0%	2.4	O

**Table 6.** Test result ( $a=24, \beta=4, \gamma=2$ )

Problem	No. of Node	No. of Subs	Z_LB	Z_TS	GAP	T_TS	LB_QoS
R1	19	117	2605.1	2605.1	0.0%	1.0	O
R2	19	159	3503.3	3547.6	1.3%	1.5	O
R3	21	159	3217.9	3243.3	0.8%	2.0	O
R4	21	180	3554.3	3554.3	0.0%	1.7	O
R5	25	154	3305.4	3347.6	1.3%	2.5	O

**Table 7.** Test result ( $a=24, \beta=8, \gamma=4$ )

Problem	No. of Node	No. of Subs	Z_LB	Z_TS	GAP	T_TS	LB_QoS
R1	19	117	2528.1	2562.5	1.4%	1.5	X
R2	19	159	2677.8	2677.8	0.0%	1.8	X
R3	21	159	2424.4	2449.4	1.0%	2.2	X
R4	21	180	2810.1	2931.3	4.3%	2.5	X
R5	25	154	2502.6	2503.8	0.0%	2.2	X

**Table 8.** Test result ( $a=24, \beta=12, \gamma=8$ )

Problem	No. of Node	No. of Subs	Z_LB	Z_TS	GAP	T_TS	LB_QoS
R1	19	117	2528.1	2562.5	1.4%	1.5	X
R2	19	159	2663.0	2677.8	0.6%	1.8	X
R3	21	159	2401.8	2449.4	2.0%	2.2	X
R4	21	180	2794.3	2931.3	4.9%	2.5	X
R5	25	154	2494.4	2503.8	0.4%	2.2	X

트래픽 파라미터는 <Table 2>와 같이 서비스 특징에 따라 5가지로 나타낸다. 서비스 트래픽은 3가지 Stream 트래픽 (Speech, High Interactive Multimedia, 그리고 Multimedia)과 2가지 Elastic 트래픽 (Messaging, Switched Data)이다.

TS 휴리스틱 알고리즘 결과와 비교할 대안은 제 2장에서 언급한 Kim (2007)의 선형 완화해이다. 선형 완화해는 비선형 QoS 제약식을 선형 제약식으로 완화하고 완화 문제의 해를 구하여 최적해를 탐색하기 위한 LB이다. 특히 선형 완화해가 종단간 QoS를 만족하는 경우 최적해이므로 TS 성능을 평가할 수 있다. 선형 완화해가 종단간 QoS를 만족하지 않더라도 최적해에 가까운 하한을 제공하므로 TS 성능 평가가 가능하다. 논문에서 제시한 TS 휴리스틱 알고리즘 해와 선형 완화해의 성능을 동일한 실험 데이터를 토대로 비교 분석한다. 이 논문의 TS 휴리스틱 알고리즘은 C를 이용하여 구현하였고, 그 결과는 Pentium IV CPU 3.00Ghz, 1Gbyte RAM PC를 이용하였다. 그리고 비교 대안으로 제시한 선형 완화해는 동일한 PC 환경에서 CPLEX 9.0을 이용하여 풀었다.

#### 4.2 실험 결과 및 분석

제 4.1절에서 언급한 실험 데이터를 사용하여 TS 휴리스틱 알고리즘 해의 성능을 선형 완화해와 비교한다. <Table 3>부터 <Table 8>은 실험 결과를 나타내고, 표의 용어에 대한 정의는 다음과 같다. 제 2장 최적화 모형에서 언급했듯이  $\alpha$  는 S-L2 스위치 포트 수,  $\beta$  는 P-L2 스위치 포트 수, 그리고  $\gamma$  는 A-ESN 포트 수로 정의한다.  $Z_{LB}$ 는 Kim (2007)이 제시한 선형 완화 문제 결과로 비선형 QoS 제약식을 선형으로 완화하여 푼 해 (백만 원)이고,  $Z_{TS}$ 는 TS 휴리스틱 알고리즘으로 얻은 해 (백만 원)이다.  $GAP$ 은 선형 완화해 ( $Z_{LB}$ )와 TS 휴리스틱 알고리즘 해 ( $Z_{TS}$ )의 상대 오차 값을 나타내고, 계산식은 아래와 같다.

$$GAP(\%) = \frac{Z_{TS} - Z_{LB}}{Z_{LB}} \times 100.$$

그리고  $T_{TS}$ 는  $Z_{TS}$ 를 얻기 위하여 소요된 시간 (초)이다.  $LB_{QoS}$ 는 선형 완화 문제 결과 ( $Z_{LB}$ )가 종단간 QoS를 만족하는지 여부 (O, X)를 나타낸다.

<Table 3>부터 <Table 8>은 노드수, 가입자 수, 그리고 스위치 별 포트 수 변화에 따른 5가지 지역모형 결과를 나타낸다. 가입자 망을 구성하는 노드수와 가입자 수가 많을수록 BcN 가입자 망 설계를 위해 설치해야 하는 스위치와 케이블이 증가하므로 총비용이 증가한다. 또한 스위치 별 포트 수 변화에서

S-L2 스위치 포트 수가  $SL2\_Max\_NS$  (19)보다 작을 경우 총비용이 증가한다. <Table 3, 4, 5>와 같이 S-L2 스위치 포트 수가 16인 경우 S-L2 스위치 포트 수가 24인 경우보다 스위치 비용과 케이블 비용이 증가한다. 그리고 S-L2 스위치 포트 수에 상관없이 P-L2 스위치와 A-ESN 포트 수가 4와 2로 작으면 총비용은 증가한다. <Table 3>과 <Table 8>에서 R1 결과를 비교하면 R1은 총비용이 약 300 (백만 원)차이로 포트 수가 작을수록 S-L2 스위치 (100) 3대나 P-L2 스위치 (300) 1대 정도 차이를 보인다.

스위치 별 포트 수 제약을 용량 제약과 비교하여 연결 가능 최대 가입자 수와 최대 하위 스위치 수를 결정하는데 이용한다. 그리고 스위치 별 포트 수가 클수록 상위 스위치에 연결 가능한 가입자와 하위 스위치는 늘지만 종단간 QoS를 보장하기 어렵다. 하지만 S-L2 스위치 포트 수에 상관없이 P-L2 스위치와 A-ESN 포트 수가 작을수록 종단간 QoS를 만족하는 망을 설계한다. 특히 <Table 3>부터 <Table 6>에서  $Z_{TS}$ 는 R2 모형을 제외하는 경우  $Z_{LB}$ 와  $GAP$ 을 1% 이내로 보장하고, 종단간 QoS를 만족하는 경우 최적해를 찾는다.

<Table 3>과 <Table 6>에서  $\beta$  와  $\gamma$  가 각각 4와 2일 때 S-L2 스위치에 연결 가능한 최대 가입자 수는 16으로 S-L2 스위치 포트 수 (16)와  $SL2\_Max\_NS$  (19) 중 작은 값으로 정한다. P-L2 스위치에 연결 가능한 최대 가입자 수는 64 (=16×4)로  $PL2\_Max\_NS$  (122)보다 작고, A-ESN에 연결 가능한 최대 가입자 수는 128 (=64×2)로  $AESN\_Max\_NS$  (262)보다 작다. P-L2 스위치와 A-ESN에서 스위치 용량제약과 가입자 수 제약조건을 만족하므로 선형 완화해는 종단간 QoS를 만족한다. 하지만 <Table 5>와 <Table 8>에서 S-L2, P-L2 스위치, 그리고 A-ESN 포트 수가 스위치 별  $Max\_NS$  보다 작은 경우 종단간 QoS를 만족하는 선형 완화해를 구하기 어렵다. <Table 4>와 <Table 7>에서 S-L2 스위치에 연결 가능한 최대 가입자 수는 19로 S-L2 스위치 포트 수 (24)와  $SL2\_Max\_NS$  (19) 중 작은 값으로 정한다. P-L2 스위치에 연결 가능한 최대 가입자 수는 152 (=19×8)로  $PL2\_Max\_NS$  (122)보다 크고, A-ESN에 연결 가능한 최대 가입자 수는 608 (=152×4)로  $AESN\_Max\_NS$  (262)보다 크다. 따라서 <Table 4>와 <Table 7>에서 설치 가능한 S-L2 스위치 수는 P-L2 스위치 포트 수보다 작고, 선형 완화해는 종단간 QoS를 만족하지 못한다.

한편, <Table 7>에서 R2와 R4는  $Z_{TS}$ 와  $Z_{LB}$ 와의  $GAP$ 이 0%이지만  $LB_{QoS}$ 는 종단간 QoS를 만족하지 않는다. 이는  $Z_{TS}$ 와  $Z_{LB}$ 에서 스위치 설치 대수는 동일하지만 스위치 위치와 스위치 사이 연결 관계가 다르기 때문이다. R2에서  $Z_{TS}$ 와  $Z_{LB}$ 의 스위치 설치 대수는 S-L2 스위치 9대와 P-L2 스위치 2대이다.  $Z_{LB}$ 는 P-L2 스위치 포트 수 제약과 가입자 수 제

약 (PL2\_Max\_NS, 122)에 의해 서로 다른 두 대의 P-L2 스위치에 S-L2 스위치가 7대, 2대가 연결된다. 하지만  $Z_{TS}$ 는  $Z_{LB}$ 와 스위치 설치 대수가 동일하지만 서로 다른 두 대의 P-L2 스위치에 S-L2 스위치가 각각 5대, 4대로 연결 관계가 균등한 해이다. 이때  $Z_{TS}$ 는 중단간 QoS를 만족하는 최적해이고, 이를 통해 개발한 TS 휴리스틱 알고리즘의 성능이 우수함을 관찰할 수 있다. 또한 TS 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 해를 구하는 경우 망을 설계하는데 걸리는 시간은 5개 지역모형에서 5초 이내이고,  $Z_{TS}$ 와  $Z_{LB}$ 와의 GAP은 평균 5% 이내로 유사한 패턴을 보인다. 특히 <Table 3>과 <Table 6>에서 스위치 별 포트 수가 스위치 별 Max\_NS 값보다 작을 경우  $Z_{TS}$ 는  $Z_{LB}$ 와의 GAP은 1% 이내로 최적해와 유사하다. 따라서 이 논문에서 개발한 TS 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 가입자 QoS를 만족하면서 비용을 최소화 하는 망을 설계할 수 있다.

## 5. 결론

BcN 가입자 망을 설계하기 위하여 고가 설비를 사용하기 때문에 망 설계 문제는 비용을 절감시킬 수 있는 최선의 방안이 필요하다. 특히 BcN 문제는 비용을 절감하면서 동시에 가입자의 중단간 QoS를 만족하는 해를 찾는 알고리즘이 필요하다. 비용 최적화와 QoS 제약 문제를 동시에 해결하기 위하여 혼합정수 계획법을 이용하여 최적화 모형을 개발하였다. BcN 문제는 비선형 QoS 제약식을 포함하므로 상용 패키지로 최적해를 찾기 어렵다. 따라서 이 논문은 TS 기법을 이용하여 스위치 비용과 케이블 비용을 최소화 하면서 중단간 QoS를 만족시키는 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다.

또한 이 논문에서 S-L2 스위치 용량에 의하여 결정되는 변수는 SL2\_Max\_NS이다. 이 논문에서 개발한 TS 휴리스틱 알고리즘은 SL2\_Max\_NS를 이용하여 중단간 QoS를 만족시키면서 총비용이 최소가 되는 S-L2 스위치 최적 포트 수를 결정한다. 따라서 노드 수 변화에 상관없이 S-L2 스위치 포트 수가 SL2\_Max\_NS (19)보다 큰 경우 TS 휴리스틱 알고리즘은 선형 완화해와 상대 오차가 5% 이내인 해를 찾았다. 또한 TS 해는 중단간 QoS를 보장하므로 실제 망 설계 시 빠른 시간 내에 최적 포트 수와 총 투자 비용을 결정하는데 유용하다. 이 논문에서 제시한 TS 휴리스틱 알고리즘 성능을 선형 완화해와 비교한 결과, 중단간 QoS를 만족하면서 노드 수와 스위치 별 포트 수가 변화하는 경우 5초 내에 선형 완화해와 상대 오차가 1% 이내인 우수해를 찾았다.

추후 연구 과제로 스위치 별 포트 수가 변동 가능하거나 포트 비용을 변동비로 설정하는 모형을 이 논문의 확장 모형으로 고려할 수 있다. 또한 서비스 별 우선순위를 고려하는 망 성

능보장 문제에 대한 연구가 필요하다. 그리고 TS 휴리스틱 알고리즘 성능을 향상시키기 위해 대형 가입자 망 설계 문제를 해결하는 알고리즘 연구를 추진할 예정이다.

## 참고문헌

- Aardal, K. (1998), Reformulation of Capacitated Facility Location Problems: How Redundant Information Can Help, *Annals of Operations Research*, **82**, 289-308.
- Aardal, K., Pochet, Y., and Wolsey, L. A. (1995), Capacitated Facility Location : Valid Inequalities and Facets, *Mathematics of Operations Research*, **20**, 562-582.
- Carello, G., F.D. Croce, M. Ghirardi, and R. Tadei (2004), Solving the Hub Location Problem in Telecommunication Network Design: A Local Search Approach, *Networks*, **44**(2), 94-105.
- Dilek, T., and I. B. Laura (1998), A Two-Phase Tabu Search Approach to the Location Routing Problem, *European Journal of Operational Research*, **116**, 87-99.
- Gendron, B., J. Y. Potrin, and P. Soriano (2003), A Tabu Search with Slope Scaling for the Multicommodity Capacitated Location Problem with Balancing Requirements, *Annals of Operations Research*, **122**, 193-217.
- Ghani, G., F. Guerriero, G. Laporte, and R. Musmanno (2004), Tabu Search Heuristics for the Arc Routing Problem with Intermediate Facilities under Capacity and Length Restrictions, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, **3**, 209-233.
- Girard, A., B. Sansò, and L. Dadjo (2001), A Tabu Search Algorithm for Access Network Design, *Annals of Operations Research*, **106**, 229-262.
- Laguna, M., J. P. Kelly, J. L. Gonzalez-Velarde, and F. Glover (1995), Tabu Search for the Multilevel Generalized Assignment Problem, *European Journal of Operation Research*, **82**, 176-189.
- Lee, Y., J. Jung, Y. Kim, S. Lee, N. Park, K. Kang (2006), A New Optimization System for Designing Broadband Convergence Network Access Networks, *Korean Management Science Review*, **23**(2), 161-174.
- Leung, J. M. Y., and Magnanti, T. L. (1989), Valid Inequalities and Facets of the Capacitated Plant Location Problem, *Mathematical Programming*, **44**, 271-291.
- Kim, Y. (2007), *Combinatorial Optimization Problems in Broadband Convergence Network (BcN) Design*, Ph. D. Thesis at Korea University.
- Nemhauser, G. L., and Wolsey, L. A. (1988), *Integer and Combinatorial Optimization*, Wiley & Sons, Inc., New York.
- Riedl, A. (2004), *Routing Optimization and Capacity Assignment in Multi-Service IP Networks*, Dissertation at Technische Universität München.
- Rochat, Y., and E. D. Taillard (1995), Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing, *Journal of Heuristics*, **1**, 147-167.
- Zhao, Z., Q. Liu, and H. Guan (2003), *A Method and Simulation Study : Network Dimensioning of the Broadband Residential Ethernet-based Access Network*, Multimedia Communication and Network Engineering Research Center.