

FTTH-PON Splitter 최적 위치 선정

Tabu Search for FTTH-PON Splitter Location-Allocation Problem

김혜원*, 이영호*, 김영진*, 한정희* *

*고려대학교 산업시스템정보공학과 (yhlee@korea.ac.kr)

**강원대학교 경영대학 (jhhan@korea.ac.kr)

Abstract

This paper deals with a physical access network design problem arising from the deployment of fiber-to-the-home passive optical networks (FTTH-PON). The problem seeks to find an optimal location and capacity assignment of splitters in the network such that the total cost of fiber and splitter is minimized, while satisfying all the demand. We propose tabu search approach for finding a good feasible solution.

1. 서론

이 연구는 FTTH 가입자망의 구축대안과 분배기 위치 설계를 위한 타부서치 알고리즘을 개발한다. FTTH 형태의 가입자망은 구리선 기반 가입자망보다 대역폭이 높아 데이터, 음성, 그리고 방송 서비스를 동시에 제공한다. 또한, 유지 보수비용이 구리선 가입자망보다 낮고, 사용자 보안성능도 높다. 그러나 FTTH 가입자망은 초기 설치비용이 높아 망 구축에 따른 투자위험이 크다. 현재 가입자망은 전화선을 이용해 서비스를 제공하므로 망 구축비용 규모가 작지만 FTTH 가입자망은 전화국과 가입자를 연결하는 광케이블과 장비를 설치해야 서비스를 제공할 수 있다. 따라서 FTTH 가입자망 구축은 비용을 고려한 최적망 설계 연구가 필요하다. PON망은 값비싼 능동형 소자 (active components) 대신 수동형 소자 (passive components)를 사용하고 전화국과 분배기 사이의 케이블을 공유하므로 경제적이다. 분배기는 설치 장소에 따라 서비스 제공 범위, 케이블 설치 거리가 다르다. 분배기 위치가 전화국에서 멀어질수록 서비스 제공 범위는 줄고 케이블 설치 거리도 줄어든다. 전화국에 근접하면 서비스 범위는 늘어나며 케이블 설치 거리도 늘어난다. 전화국과 분배기는 케이블 1개로 연결되지만 분배기와 가입자는 가입자마다 케이블을 설치하므로, 전화국과 분배기를 연결하는 케이블 길이가 길수록 전체 케이블 설치 거리는 줄어들게 된다. 그러나 케이블 설치 거리를 줄이기 위해 분배기를 가입자와 가까운 곳에 설치하면 서비스 제공 범위가 줄어들어 분배기의 용량만큼 가입자를 할당하지 못하므로 필요 없는 분배기

설치가 늘어난다. 광 가입자망 설계는 분배기 위치 설계와 함께 전화국과 집을 연결하는 망 형태, FTTH 가입자 수요를 고려해야 한다. 이 연구는 Lee Y. *et al.*과 같이 전화국과 집을 연결하는 망 형태를 분기방법으로 정의하고, 장비와 케이블의 최적 설치를 위한 휴리스틱 알고리즘을 개발한다.

분기방법은 전화국과 가입자를 연결할 때 사용하는 분배기 개수에 따라 구분하는데, 가입자를 분배기 1개나 2개를 이용하여 전화국과 연결한다. 이 때 분배기 1개를 이용하는 방법을 1단 분기, 분배기 2개를 이용하는 방법을 2단 분기 모형으로 정의한다. 이 문제의 최적화 수확모형은 Lee Y. *et al.*이 개발하였다 (2005).

이와 유사한 문제의 휴리스틱 기법 연구에는 Carello G. *et al.*의 Two-level Network를 계획하는 문제에 Local Search를 적용한 연구가 있다 (2004). 이들은 Local Search를 위해 Optimization Step에서 Transit 노드를 결정하는 Location 문제를 해결한 뒤, Post Optimization Step에서 Transit 노드 쌍을 바꾸며 액세스 노드를 할당하는 방법을 적용하였다. 또한 Dlek T. and Laura I. B.는 Location routing 문제에 Two-Phase Tabu Search를 적용하였다 (1998).

이 논문은 휴리스틱 기법으로 PON 기술을 이용하는 FTTH 가입자망을 최적 설계한다. 이를 위해 타부서치 알고리즘을 개발한다. 먼저 1단 분기 모형의 최적 망 설계를 위해 Top-Down과 Bottom-Up 방식을 적용한다. 그리고 2단 분기 모형은 1단 분기 모형의 Top-Down과 Bottom-Up 방식을 적용하여 두 번째 분배기를 할당한 뒤, 모형을 변형하여 첫 번째 분배기를 할당한다. 논문 구성은 다음과 같다. 2장에서 이 문제에 대해 소개하고 3장에서 타부서치 알고리즘을 제시한다. 또한, 4장에서 결론과 향후 연구 과제를 기술한다.

2. FTTH 망 설계의 최적화 모형

분배기 위치에 따른 FTTH 망 설계에서 고려하는 분기 방법인 망구조에 대해 설명한다. 그리고 문제에서 사용된 지역 모형을 바탕으로 최적화

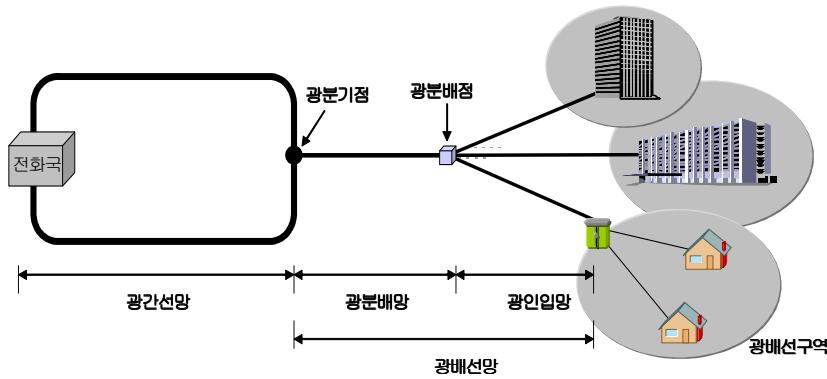


그림 1. PON 망 구조 예

수학 모형을 설명한다.

2.1. 망 구조

이 연구는 PON 형태의 가입자망 구조를 선정한다. PON은 값비싼 능동형 소자 (active components) 대신 수동형 소자 (passive components)를 사용하고 전화국과 분배기 사이의 연결 케이블을 공유하므로 경제적이다. 그림 2는 광배선 구역의 가입자가 광 분배망의 광케이블을 공유하고 광분배점에서 분배된 케이블로 연결된 형태를 나타낸다. 분배기가 전화국과 가까운 곳에 설치되면 서비스 제공 범위는 늘어난다. 그러나 공유하는 광케이블 거리는 줄어들고 분배기와 가입자를 연결하는 케이블 거리가 증가하여 투자비용이 상승한다. 반대로 분배기를 가입자에 가까운 곳에 설치하면 공유하는 광케이

블 거리는 늘어나고 가입자 까지 연결하는 케이블 거리는 줄어들어 케이블 비용이 낮아진다. 그러나 분배기의 서비스 제공 범위가 줄어 분배기 설치 대수는 늘어나며 투자비용이 상승할 수 있다.

가입자망을 구성은 분배기 위치뿐만 아니라 설치 개수에 따라 달라진다. 전화국과 가입자를 분배기 1개나 2개를 통해 연결할 수 있기 때문이다. 먼저 분배기 1개를 이용한 1단분기는 전화국 (Central Office, CO)에서 분배기까지 케이블 하나로 연결하고 분배기와 가입자는 독립된 케이블로 연결한다. 그림 2는 32분기 분배기를 사용하는 1단분기 형태를 보여주고 있다. 1단분기의 장점은 설치 분배기 개수가 적고, 서비스 제공 지역의 밀집도가 높은 지역에 적합하다.

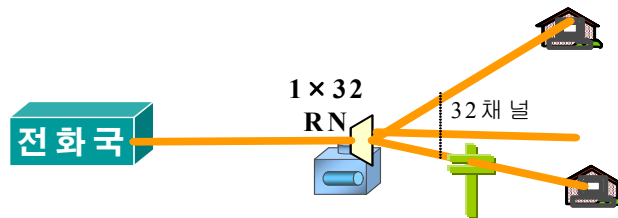


그림 2. 1단분기 모형

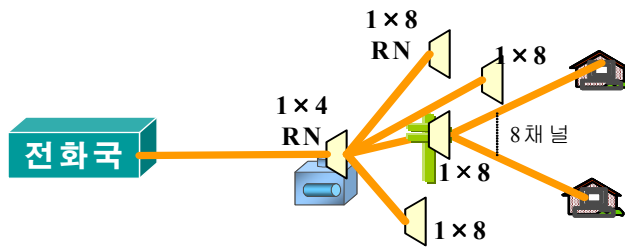


그림 3. 2단분기 모형

한편, 분배기를 2개 이용하여 연결하는 형태를 2단분기라고 하는데, 인입망 구조가 복잡한 형태의 가입자망과 수요가 분산된 서비스 지역에 적합하다. 그림 3은 4x8 2단분기 형태를 보여주고 있다. 4x8 2단분기는 1x4 분배기를 한 개 그리고 1x8 분배기를 네 개 사용한다. 2단분기는 1단분기 보다 분배기 사용 개수는 증가한다. 그러나 32채널을 분배기 4개로 분산하기 때문에 서비스 제공 지역이 넓다.

2.2. 최적화 모형

집합

N : 노드의 집합으로 분배기 후보지 노드와 수요 노드를 나타냄

N_0 : 수요 노드를 나타내는 N 의 부분집합

S_i : 노드 $i \in N$ 에서 광분배점까지 설정된 경로에 포함된 노드의 집합

E : 링크의 집합으로 지역모형에서 맨홀과 맨홀을 연결한 관로, 맨홀에서 전주나 광단자함으로 연결되는 링크

P_i : 노드 $i \in N$ 에서 광분배점까지 경로에 포함된 링크 집합

P_{ij} : 노드 $i \in N$ 에서 $j \in N$ 까지 경로에 있는 링크 집합

L : 케이블 종류의 집합

모수

α_{ij}^l : 링크 $(i, j) \in E$ 에 설치할 케이블 종류 l 의 설치비용 (비용은 링크 거리에 비례함)

γ^1 : 1단분기의 분배기 설치비용이다.

γ_1^2 : 2단분기 모형에서 첫 번째 분기되는 분배기의 설치비용

γ_2^2 : 2단분기 모형에서 두 번째 분기되는 분배기의 설치비용

a^l : $l \in L$ 종류 케이블의 광 코어 수

b^1 : 1단분기 방법의 분배기 용량

b_1^2 : 2단분기 방법의 첫 번째 분배기 용량

b_2^2 : 2단분기 방법의 두 번째 분배기 용량

결정변수

x_{ij} : 수요지 $i \in N_0$ 에 분배기가 설치된 $j \in S_i$ 로 연결되는 코어 수 비율로 0에서 1사이 값을 가짐.

y_{ij}^l : 링크 $(i, j) \in E$ 에 종류 $l \in L$ 의 케이블을 설치하면 1이고, 그렇지 않으면 0

z_j : $j \in N$ 지역에 분배기를 설치하면 1이고, 그렇지 않으면 0 (2단분기 모형의 경우는 첫 번째 분기되는 분배기의 위치를 나타냄)

f_{jk} : 2단분기 모형에서 $k \in S_j$ 지역에서 첫 번째 분기되어 $j \in N_1$ 지역에 두 번째 분기되는 분배

기를 설치하면 1이고, 그렇지 않으면 0

1단분기 모형

1단분기 모형의 수요지는 1단분기를 통해 광분배점으로 연결되어야 한다. 또 분배기는 32분기 (1x32)만을 고려한다. 1단분기 모형의 비용은 링크의 케이블 설치비용과 분배기 후보지에 설치할 장비비용의 합이다.

모형 1:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \sum_{i \in L} \sum_{(i,j) \in E} \alpha_{ij}^l y_{ij}^l + \sum_{j \in N} \gamma z_j \\ & \text{subject to} \\ & \quad \sum_{j \in S_i} x_{ij} = 1, \quad i \in N, \\ & \quad \sum_{i: j \in S_i} d_i x_{ij} \leq b^1 z_j, \quad j \in N, \\ & \quad \sum_{i \in N_0} \sum_{(p,q) \in P_{ij}} d_i x_{ij} + \sum_{j: (p,q) \in P_j} z_j \leq a^l y_{pq}^l, \quad (p,q) \in E, \\ & \quad \sum_{l \in L} y_{ij}^l \leq 1, \quad (i,j) \in E, \\ & \quad 0 \leq x_{ij} \leq 1, \quad i \in N_0, \quad j \in S_i, \\ & \quad z_j \geq 0, \text{ integer}, \quad j \in N, \\ & \quad y_{ij}^l \in \{0, 1\}, \quad (i,j) \in E, \quad l \in L. \end{aligned}$$

2단분기 모형

2단분기 모형에서 수요지는 두 번째 분기 분배기에 연결된다. 두 번째 분기 분배기는 첫 번째 분기 분배기에 연결되고, 첫 번째 분기 분배기는 광분배점으로 연결된다. 2단분기 모형은 2x16, 4x8, 8x4, 16x2의 분배기 조합으로 구성된다. 2단분기 최적화 모형은 첫 번째 분기 분배기와 두 번째 분기 분배기 용량이 주어졌을 때 총비용을 최소로 하면서 수요를 만족하는 분배기의 위치와 구간별 소요 케이블을 결정한다. 2단분기 모형에서 발생하는 총 비용은 각 링크에서 케이블 설치비용과 분배기 후보지에 설치할 첫 번째 분기 분배기와 두 번째 분기 분배기 장비비용의 합이다.

모형 2:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \\ & \quad \sum_{i \in L} \sum_{(i,j) \in E} \alpha_{ij}^l y_{ij}^l + \sum_{j \in N} \gamma_1^2 z_j + \sum_{j \in N} \sum_{k \in P_j} \gamma_2^2 f_{jk} \\ & \text{subject to} \\ & \quad \sum_{j \in S_i} x_{ij} = 1, \quad i \in N_0, \end{aligned}$$

$$\sum_{j: k \in S_j} f_{jk} \leq b_1^2 z_k, \quad k \in N,$$

$$\sum_{i: j \in S_i} d_i x_{ij} \leq b_2^2 \sum_{k \in S_j} f_{jk}, \quad j \in N,$$

$$\sum_{i \in N_{ij}: (p, q) \in P_{ij}} d_i x_{ij} + \sum_{j, k: (p, q) \in P_{jk}} f_{jk} + \sum_{j: (p, q) \in P_j} z_j \leq a^l y_{pq}^l, \quad (p, q) \in E,$$

$$\sum_{l \in L} y_{ij}^l \leq 1, \quad (i, j) \in E,$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \quad i \in N_0, \quad j \in S_i,$$

$$z_j \geq 0, \text{ integer}, \quad j \in N,$$

$$f_{jk} \geq 0, \text{ integer}, \quad j \in N_0, \quad k \in S_i,$$

$$y_{ij}^l \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in E, \quad l \in L,$$

3. 타부서치

3.1 초기해와 해 향상 과정

Top-Down Approach

Top-Down 방법은 전체 수요를 수용할 수 있는 양의 분배기를 분배점과 최대한 가깝게 설치하여 초기해를 구한다. 그리고 Swap Move를 통해 케이블 비용을 줄여 해를 향상 시킨다. 초기해를 구하기 위해 먼저 모든 수요를 수용할 수 있는 분배기 최소 개수를 분배점에 설치한다. 그리고 모든 수요는 분배점에 할당된다. 이 때 링크를 지나는 수요가 케이블의 최대 용량을 초과할 경우 해가 Infeasible하다. 각 링크는 케이블을 한개만 설치할 수 있기 때문이다. 따라서 Feasible한 해를 구하기 위해 분배점의 분배기를 링크를 지나는 수요가 케이블의 최대 용량을 초과하는 링크의 하위 노드로 이동한다. 이 과정은 링크를 지나는 수요가 케이블의 최대용량보다 작아질 때까지 수행된다. 그리고 이 과정을 지나 구한 Feasible한 해를 초기해로 사용한다.

해향상 과정을 통해 위에서 구한 초기해를 향상 시킨다. 초기해 향상 과정은 분배기를 하위 노드로 이동시키면서 케이블 비용을 줄이는 방법을 통해 이루어진다. 이 과정을 위해 분배기를 이동시킬 하위노드를 검색한다. 하위노드 중 분배기를 이동하여도 해가 Feasible한 경우만 고려된다. 그리고 각 하위노드 중 해가 개선된 경우만 분배기가 이동한다. 하위노드로 분배기를 이동시켜 해가 개선되지 않을 경우 해향상 과정을 마친다.

Bottom-Up Approach

Bottom-Up 방법의 초기해는 가장 하위 노드인 수요 노드에 모든 분배기를 설치한다. 분배기 수는 각 수요 노드의 수요를 수용할 수 있는 만큼

설치한다. 이 때 모든 수요는 자기 노드의 분배기에 할당된다. 그리고 수요노드에 설치된 분배기를 상위 노드로 이동시키면서 초기해를 향상시킨다.

Bottom-Up Approach의 해향상 과정은 분배기가 설치된 상위 노드에 분배기를 추가한 뒤, Feasibility를 만족하면서 제거할 수 있는 모든 하위 노드 분배기를 제거하면서 분배기 비용을 줄인다. 이 과정도 Top-Down Approach와 같이 상위 노드에 분배기를 추가해도 해가 개선되지 않을 경우 해향상 과정을 마친다.

3.2. 타부서치

1단분기

1단 분기 모형에 Top-Down과 Bottom-Up 방법을 적용하여 초기해를 구한 뒤, 해향상 과정을 통해 초기해를 향상시킨다. 그리고 Swap move와 Add & Drop Move를 차례로 수행한다. Evaluation 단계에서 Tree Network 특성을 이용하여 링크의 케이블과 수요의 할당이 이루어진다. 이 방법은 링크 케이블과 수요 할당을 최적화한다.

2단 분기 모형은 1단분기에서 사용한 타부서치를 반복 사용하여 해를 구한다. 2단 분기 모형의 해를 구하기 위해 먼저 두 번째 분배기만을 고려한 상태에서 1단분기 모형과 같이 Top-Down 방법이나 Bottom-Up 방법을 사용하여 초기해를 구하고 해를 향상 시킨다. 그리고 타부서치를 통해 두 번째 분배기를 설치한다. 타부서치 과정을 통해 구한 최선해에서 두 번째 분배기가 설치된 노드를 수요노드로 하고, 분배기 개수를 수요로 하는 1단분기 모형을 작성한다. 그 후 변형 모형에 첫 번째 분배기를 할당하는 문제를 1단분기 모형 방법을 적용하여 첫 번째 분배기의 해를 구한다.

Move

1단분기 모형의 타부서치 Move는 Add Move, Drop Move, 그리고 Swap Move를 사용한다. 먼저 향상된 초기해에 Swap Move를 적용한다. 그리고 일정 기준에 따라 Swap Move가 중단되면 Add Move로 분배기 수를 증가시키거나 감소시키면서 개선된 해를 찾는다. Add Move도 일정 기준에 따라 중단된다. Add Move가 중단되면 변화된 분배기 수를 고정한 상태에서 위치를 변화시키는 Swap Move를 적용한다. 그리고 Swap Move가 중단되면 이번에 분배기 수를 감소시키며 개선된 해를 구하는 Drop Move를 적용한다. 다시 말해 Add Move, Swap Move, Drop Move, 그리고 Swap Move를 반복하여 적용한다.

Swap Move는 분배기를 주변 노드로 옮겼을 때 해가 개선되거나, 해가 개선되지 못한 정도가 가장 작은 Move를 Best Move로 선정한다. 그리고 Neighborhood 수를 줄이기 위해 분배기를 하위 노드로 옮겼을 때 해가 Feasible한 주변 노드만 Neighborhood에 포함시킨다. Swap Move는 해가 개선되지 않은 Move가 연속적으로 나타난 횟수가 Max Swap와 같아질 때까지만 수행한다.

해가 개선되지 않은 Swap Move가 연속적으로 나타난 횟수가 Max Swap과 같아지면 Add Move를 수행한다. Add Move는 분배기가 설치된 상위나 하위 노드에 분배기를 추가한 뒤, Feasibility를 만족하면서 제거할 수 있는 모든 하위 노드 분배기를 제거하는 방법이다. 따라서 분배기의 수를 줄이거나 하위로 이동시키며 비용을 감소시킬 수 있는 해를 찾는 Move이다.

Add Move를 위해 분배기가 설치된 노드의 주변 노드를 찾는다. 이 주변 노드가 Add 노드가 된다. 그리고 각 Add 노드에 대해 Add 노드에 분배기를 추가했을 때 분배기를 제거할 수 있는 Drop 노드를 찾는다. 그리고 각 Add 노드의 Drop 노드 중 Feasibility를 만족하며 비용절감이 가장 큰 노드를 Drop 노드를 정한다. 이 때 각 Add 노드의 Drop 노드는 Feasibility를 만족시키는 동안 여러 개가 선정될 수 있다. Add Move는 해를 개선하거나, 해가 개선되지 못한 정도가 가장 작은 Move를 Best Move로 선정한다. 그리고 Add Move는 해가 개선되지 않은 Move가 연속적으로 나타난 횟수가 Max Add와 같아질 때까지 수행된다.

Drop Move는 설치된 분배기를 삭제하여 분배기 비용을 줄이는 방법으로 개선해를 찾는다. Drop Move를 위해 설치된 분배기를 제거할 수 있는 Drop 노드를 검색한다. 분배기를 제거할 수 있는 Drop 노드란 분배기를 제거해도 해가 Feasible한 해를 의미한다. Drop 노드 중 해를 개선하거나, 해가 개선되지 못한 정도가 가장 작은 Move를

Solution 보다 작을 경우는 Move로 선정된다.

Stopping criterion

Move가 Best solution을 개선하지 못하는 횟수가 일정 횟수 이상 되면 타부서치를 끝낸다.

Evaluation

Evaluation 과정에서 설치된 분배기 정보를 바탕으로 수요와 케이블을 할당한다. 수요는 가장 가까운 분배기에 할당된다. 만약 가장 가까운 분배기의 용량이 초과될 경우 수요는 상위 분배기에 할당된다. 같은 수요 노드에서 발생한 수요는 여러개 분배기에 나누어 할당될 수 있기 때문에, 분배기의 용량이 초과하지 않는 가장 가까운 분배기에 나누어 할당하는 것이 수요의 최적 할당이 된다. 수요를 이 방법으로 할당한 뒤 각 링크를 지나는 수요와 분배기 케이블 수를 합하여 Link Demand를 구한다. 그리고 Link Demand보다 크거나 같은 케이블을 링크 케이블로 선정한다. 케이블 선정이 끝난 뒤 케이블 가격에 링크 거리를 곱하여 각 링크의 케이블 비용을 구한 후 모두 합하여 케이블 총비용을 계산한다. 분배기 비용은 분배기 개수에 분배기 가격을 곱하여 구한다. 총 비용은 케이블 비용과 분배기 비용을 합하여 구한다.

위의 과정은 초기해를 구한 뒤 총 비용을 계산할 때 사용된다. 반면 Move를 Evaluation 할 경우 변경된 분배기 정보에 따라 모든 케이블 비용을 다시 계산하는 것은 매우 낭비이다. Move에 의해 변경된 분배기 정보에 따라 영향 받는 링크 케이블은 일부이기 때문이다. 따라서 Move

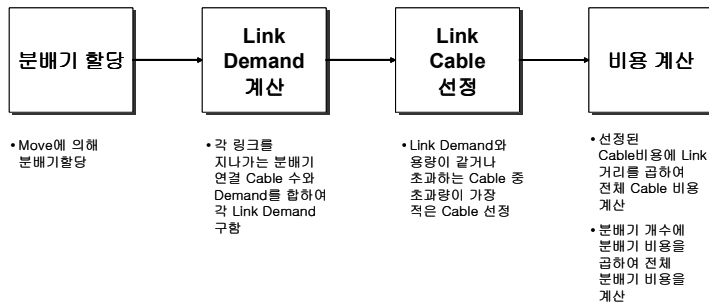


그림 4. Evaluation

Best Move로 선정한다. 그리고 Drop Move는 해가 개선되지 않은 Move가 연속적으로 나타난 횟수가 Max Drop과 같아질 때까지만 수행된다.

Tabu

분배기가 설치되거나 삭제된 노드를 Tabu로 선택한다. 노드가 Tabu List에 있는 동안은 특별한 경우를 제외하고 분배기가 설치되거나 삭제되지 못한다. Tabu List 크기는 3 Move 이다.

Aspiration criterion

Tabu List에 있는 Move이나 Move의 값이 Best

Evaluation은 분배기가 추가 되거나 삭제된 노드와 분배점 노드 사이에 있는 링크 케이블에만 적용된다. 그리고 분배기 비용은 현재해의 분배기 비용에 추가된 분배기 비용을 더하고 삭제된 분배기 비용을 빼서 구한다.

2단분기

2단분기 모형의 특징은 분배기 2개를 이용하여 연결하는 방법이다. 따라서 모든 수요는 두 번째 분배기에 연결되어야 하고 모든 두 번째 분배기는 첫 번째 분배기에 연결되어야 한다. 이는 1단

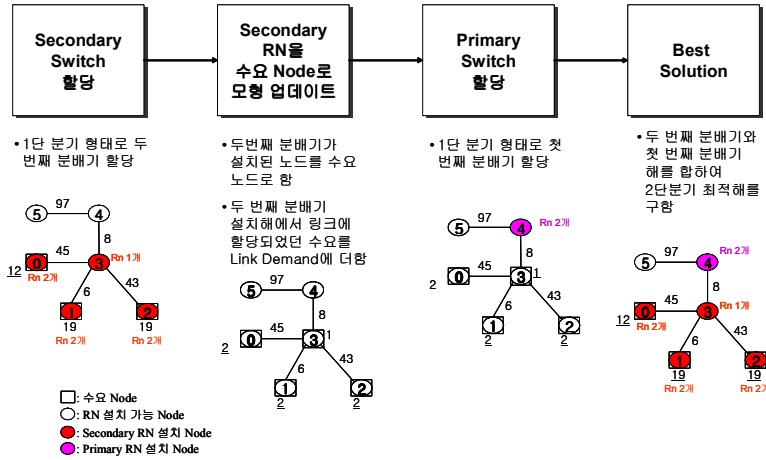


그림 5. 2단분기 모형의 타부서치

분기 모형을 두 번 겹쳐 놓은 것과 같은 특징을 가지고 있다. 따라서 2단분기 모형은 1단분기 모형의 해를 구하는 방법을 반복 사용하여 해를 구한다. 2단 분기 모형의 해를 구하기 위해 먼저 두 번째 분배기만을 고려한 상태에서 1단분기 모형과 같이 Top-Down 방법이나 Bottom-Up 방법을 사용하여 초기해를 구하고 향상시킨다. 또한, 향상된 초기해로 타부서치를 이용해 두 번째 분배기 할당의 최선해를 구한다. 그리고 이 해에서 결정된 두 번째 분배기 설치 노드를 수요노드로 하고, 두 번째 분배기 설치시 링크에 할당되었던 수요를 고려하여 Modified Model을 만든다. 다시 말해, 두 번째 분배기가 설치된 노드를 수요노드로 하고 분배기의 개수를 각 수요 노드의 수요로 하는 1단 분기 모형을 만든다. 이때 두 번째 분배기 설치시 링크에 할당되었던 수요를 Link Demand에 더해주는 것은 첫 번째 분배기의 위치에 따른 케이블을 정할 때 두 번째 분배기 설치시 발생했던 Link Demand까지 수용할 수 있는 케이블을 선정해야 하기 때문이다.

4. Conclusion

이 논문은 FTTH-PON Splitter Location-Allocation 문제를 해결하기 위한 타부서치 알고리즘을 개발하였다. Top-Down과 Bottom-Up 방식으로 초기해를 구한 뒤 해를 향상 시킨다. 그리고 향상된 초기해에 타부서치 알고리즘을 적용한다.

이 연구의 추후 연구 과제에는 Exact Optimal Solution을 구하는 알고리즘 개발과 수요의 불확실성을 반영한 Stochastic Programming 연구가 있다.

참고문헌

Carello G., Croce F. D., Ghirardi M., and Tadei R., (2004), Solving the Hub Location Problem in telecommunication Network Design: A Local

Search Approach, NETWORKS, 44(2), 94-105.
 Dilek T., and Laura I. B., (1998), A two-phase tabu search approach to the location routing problem, *European Journal of Operational Research*, 116, 87-99.
 Lee Y., Hahm T., Kim Y., and Han J. (2005), PON 망 구조와 RN 위치에 따른 FTTH 가입자망의 경제성 분석