

생존성을 보장하는 링-그물 구조를 가진 광 인터넷 WDM 망 최적 설계

정희원 이영호*, 박보영*, 박노익**, 이순석**, 김영부**, 조기성**

A Ring-Mesh Topology Optimization in Designing the Optical Internet

Youngho Lee, Boyoung Park, Noik Park, Soonsuk Lee, Youngbu Kim,
Kisung Cho *Regular Members*

요 약

이 논문은 파장 분할 다중화 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 기술의 링-그물 구조를 가진 망을 설계하는 알고리즘을 제시한다. 링-그물 망을 설계하는 문제는 OADM과 OXC 비용을 최소화 하면서 트래픽을 만족시키는 그물 라우팅과 링 토폴로지를 설계한다. 링 토폴로지는 OADM으로 구성되어 링 내의 노드간 트래픽을 처리하고, 그물 라우팅은 서로 다른 링에 있는 노드간에 발생하는 트래픽을 OXC를 이용해서 처리한다. 링 토폴로지와 그물 라우팅 문제를 동시에 해결하기 위해서 정수 계획법 (Integer Programming) 모델을 개발한다. 링-그물 문제는 NP-Hard이므로 실제 크기의 망 문제에서 주어진 시간내 좋은해를 생성하는 효과적인 타부 서치 휴리스틱을 제안한다. 타부 서치 휴리스틱 성능을 상업용 소프트웨어인 CPLEX 7.0 으로 구한 해와 비교한 결과 5초 내에 총 비용의 오차 범위가 3% 이내인 우수해를 구한다.

ABSTRACT

In this paper, we deal with a ring-mesh network design problem arising from the deployment of WDM for the optical internet. The ring-mesh network consists of ring topology and full mesh topology for satisfying traffic demand while minimizing the cost of OADMs and OXCs. The problem seeks to find an optimal clustering of traffic demands in the network such that the total number of node assignments is minimized, while satisfying ring capacity and node cardinality constraints. We formulate the problem as a mixed-integer programming model and prescribe a tabu search heuristic procedure. Promising computational results within 3% optimality gap are obtained using the proposed method.

1. 서 론

인터넷 보급율이 70%로 늘어 정보 전송량도 급격히 증가하고 있다. 2002년 6월 현재 인터넷 사용자는 2,600만 명이고, 2000년 말에 440만개인 홈페이지 개수도 880만으로 2배 증가하였다 [20]. 또한, 서비스 종류도 텍스트에서 동영상 이미지 서비스로 바뀌고

있다. 서비스 트래픽이 이미지와 동영상으로 바뀌면서 늘어나는 정보 전송량을 효율적으로 처리하기 위해 광 대역 전송이 가능한 새로운 기간망 구성이 필요하다. 광대역 기간망 구성을 위해 파장 분할 다중화 방식 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 이 고려되고 있다 [9, 10].

*고려대학교 산업시스템정보공학과

**한국전자통신연구원

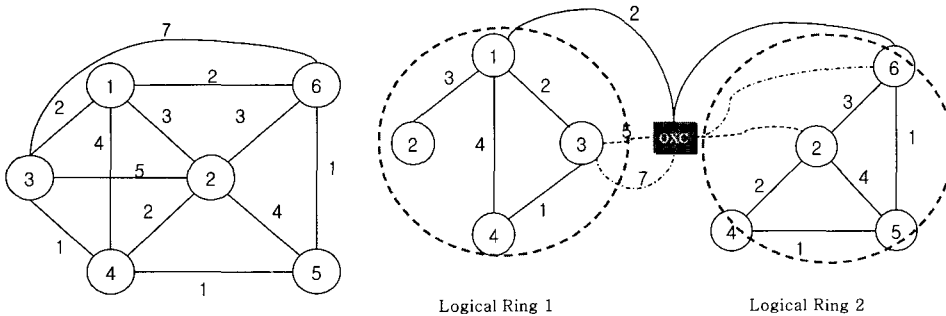
논문번호: 030127-0321, 접수일자: 2003년 3월 21일

광대역 전송 기술 대안으로 WDM은 서로 다른 파장을 이용해서 대용량 트래픽을 동시에 전송할 수 있다 [17]. WDM 전송망은 Synchronous Optical Network (SONET) 및 Synchronous Digital Hierarchy (SDH) 전송망을 진화시킨 기간 통신망에 이용되고 있다 [21]. 기간 통신망에서 사용되는 SONET 망은 운용 및 유지보수가 편리하고 생존성을 보장할 수 있는 링(Ring) 구조를 채택하고 있다 [3, 13]. 운용 유지 보수가 편리하고 생존성이 보장되는 링 구조 특성 때문에 WDM 전송망도 링 형태를 선호하고 있다. 링 형태와 더불어 생존성을 보장하는 망으로 그물(Mesh) 구조가 있다 [8]. 그물 구조는 모든 노드가 연결되어 노드 쌍 사이에 연결이 끊어지면 다른 노드 쌍을 이용하여 트래픽을 전송한다. 그물 구조 망은 생존성이 보장되고 링 구조에 비해 망 용량 증설이 용이하여 경제적인 구조로 인식되고 있다 [6]. 이처럼 생존성과 신뢰성이 보장되는 링과 그물 형태가 WDM 전송망을 설계할 때 선호되면서, 링과 그물 구조가 지닌 장점을 이용한 링-그물 혼합 구조가 부각되고 있다.

이 논문에서 제안하는 링-그물 구조에서 링 토폴로지(Topology)는 OADM으로 구성하여 링에 할당된 노드간 트래픽(Intra-Ring Traffic)을 처리하고, 그물 라우팅은 서로 다른 링에 있는 노드간에 발생하는 트래픽(Inter-Ring Traffic)을 완전 그물 구조(Full-Mesh) OXC 망으로 처리한다. 링을 구성하는 방법에 따라 OADM 개수가 줄어들고 서로 다른 링에 있는 노드 간에 발생하는 트래픽을 처리하는 OXC 개수도 줄어든다. 따라서, 전체 OADM과 OXC 비용은 링 토폴로지 구성과 그물 구조 라우팅 방법에 의존한다 [2, 12]. 그림 1은 링-그물 구조를 설계하는 예제를 보여준다.

그림 1 (a)는 노드 수 6개, 노드 간 트래픽 쌍이 12개로 구성된 망이다. 링에 포함할 수 있는 최대 노드 수는 4개, 최대 파장 수는 11개로 제약을 둔다. 여기서 링 2개와 OXC 1개로 링-그물 구조 망을 그림 1 (b)와 같이 구성한다. 그림 1(b)에서 링 1은 노드 1, 2, 3, 4 로 구성되고, 처리되는 트래픽(노드간의 필요 파장수) 합은 10 ((1,2)=3, (1,3)=2, (1,4)=4, (3,4)=1)으로 링에서 허용된 최대 파장 수 제약 조건을 만족한다. 그림 1(b)에서 링 2는 노드 2, 4, 5, 6 으로 구성되고, 링 에서 처리되는 트래픽 합은 11 ((2,4)=2, (2,5)=4, (2,6)=3, (4,5)=1, (5,6)=1)로 링에서 허용된 제약 조건을 만족한다. 그림 1(b)에서 링 1에 있는 노드 1과 링 2에 있는 노드 6, 링 1에 있는 노드 3과 링 2에 있는 노드 6, 링 1에 있는 노드 3과 링 2에 있는 노드 2 사이 노드에서 발생하는 링간(Inter-Ring) 트래픽 수요 14는 OXC를 이용하여 처리한다. 링 2개와 OXC 1개로 구성된 망 설계 비용은 OADM 8개 비용, OXC 1개 비용, 노드 쌍 (1, 6), (3, 6), (3, 2)에서 발생하는 트래픽을 처리하기 위해서 링을 연결하는 OXC 비용으로 구성된다.

링 구조 망 설계 문제로 OADM 비용을 최소로 사용하여 링 구조를 가진 WDM 망 설계 문제를 Lee et. al (2000)이 제시했다 [11]. 이 연구는 광 인터넷 망 설계 비용을 최소화하기 위해 노드 사이에 발생하는 트래픽을 링 내부에서 모두 처리하는 망 설계 문제를 해결했다. 따라서, 서로 다른 링에 있는 노드 사이에 트래픽이 전혀 발생하지 않게 망을 구성한다. 한편, Morley와 Grover (1999)는 망을 여러 개 링으로 구성하여 비용을 최소화하는 복수-링 설계 문제를 제시했다 [14, 19]. Morley와 Grover는 복수-링 문제를 풀 때, 미리 정해 놓은 경로를 이용하여 비용을 최소로 하는 해를 찾고, Morley (2001)는



(a) 전체 망

(b) 링-그물 구조

그림 1. 링-그물 예제

WDM 구조를 지닌 광 인터넷 망을 설계하는 휴리스틱 방법을 제시했다 [12]. 제안된 타부 서치 휴리스틱은 사전에 생성한 링만을 고려하는 한계가 있다. 링 구조 외에도 그물 구조를 이용하여 망을 설계하는 방법이 있다. Grover와 Doucette (2001)은 생존성을 보장하기 위해 그물 구조에서 라우팅 문제를 푸는 방법을 제시한다 [4, 5]. 미리 정해 놓은 경로를 이용하여 그물 라우팅을 적용하여 망을 설계하므로 최적해 (Global Optimum)를 보장하지 않는다. 그물 구조를 갖는 망을 설계한 논문으로 정노선, 안기석 (2000)은 트래픽을 예측하는 방법을 제시했다 [22]. 기존 논문의 한계는 링을 미리 구성한 뒤 노드를 할당하고, 라우팅을 사전에 정한 뒤 링을 구성하므로 비경제적인 해를 찾게 되는 한계가 있다. 이러한 기존 방법의 한계를 극복하기 위해 이 논문에서 제안하는 방법은 링 토폴로지 설계와 그물 구조 라우팅을 동시에 해결하는 방법을 새로 개발한다. 이 논문은 링-그물 구조를 가진 WDM 망에서 OADM과 OXC 개수를 최소화하여 망 설계 비용을 줄이고, 다양한 트래픽 상황에 적용이 가능한 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘을 이용하여 비용을 줄이면서 망을 효율적으로 설계하기 위해 정수 계획법 (Integer Programming)과 타부 서치 휴리스틱 (Tabu Search Heuristic)을 이용한다.

이 논문은 다음과 같이 구성된다. II장은 링-그물 망 구조 문제를 정수 계획 모델로 제시한다. 링-그물 문제는 NP-Hard 이므로 제한된 시간내에 최적해를 구하기 어렵기 때문에 III장에서 새로운 휴리스틱을 개발한다. IV장은 타부 서치 휴리스틱을 이용한 결과를 제시하고, 끝으로 V장은 결론을 맺는다.

II. 링-그물 망 설계 수학 모형 (Formulation)

그림 2는 OADM으로 링 토폴로지를 구성하고 OXC로 완전 그물 토폴로지를 구성한 링-그물 구조를 보여준다. 여기서, OADM 링은 링 안에 있는 노드 간의 트래픽을 처리하고, OXC를 완전 그물 형태로 구성하여 서로 다른 링에 있는 노드간에 발생하는 트래픽을 처리한다 [7, 15, 16].

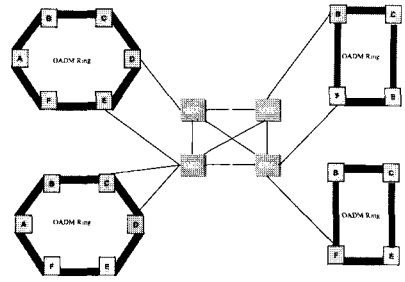


그림 2. 링-그물 망 구조

링-그물 망 설계 문제를 수학적식으로 나타내기 위해 필요한 모수는 다음과 같다.

- K : 링 집합,
- M : OXC 집합,
- N : 노드 집합,
- E : 노드 쌍 (i, j) 집합, $i \in N, j \in N$,
- d_{ij} : 노드 i 와 노드 j 사이 트래픽 양 (파장 수), $(i, j) \in E$,
- b^a : OADM 용량 (파장 수),
- b^x : OXC 용량 (파장 수),
- l^a : 링 1개에 포함될 수 있는 OADM의 최대 개수,
- α_i : 노드 $i \in N$ 에서 OADM을 설치할 때 발생하는 비용,
- β_{gr} : 노드 $i \in N$ 와 노드 $j \in N$ 사이 트래픽을 처리하기 위해서 노드 $s \in M$ 와 $t \in M$ 에 설치된 OXC를 사용할 때 발생하는 비용,
- γ_s : OXC를 노드 $s \in M$ 에 설치할 때 발생하는 비용.

망 설계에 필요한 의사결정 변수를 정의하면, 노드 $i \in N$ 가 링 $k \in K$ 에 포함되면 $x_{ik} = 1$ 이고, 아니면 0이다. 노드 $i \in N$ 와 $j \in N$ 사이

에 발생하는 트래픽이 링 $k \in K$ 에서 처리되면 $f_{ijk} = 1$ 이고, 아니면 0이다. 링 사이에 발생하는 트래픽 $(i, j), i, j \in N$ 가 OXC 쌍 $s, t \in M$ 을 통해서 처리되면 $y_{ijst} = 1$ 이고, 아니면 0이다. 노드 $s \in M$ 에 OXC가 설치되면 $z_s = 1$ 이고, 아니면 0이다. 그리고 노드 i 와 j 는 순서쌍으로 나타내서 f_{ijk} 에서 $i < j$ 를 뜻한다. 링-그물 망 설계 문제 수식을 모델 RM이라 부르고, 정수 계획법으로 표현하면 다음과 같다.

모델RM에서 식 (1)은 링 1개에 포함할 수 있는 OADM의 최대 개수가 l^a 를 넘을 수 없음을 설명하고, 식 (2)는 링에 포함할 수 있는 최대 파장수를 b^a 로 제약한다. 식 (3)은 모든 수요 쌍은 링에 포함되거나 또는 OXC에 연결됨을 의미한다. 식 (4)는 OXC에 연결된 노드 사이 수요의 합은 OXC 용량 b^s 로 제약한다. 식 (5)와 (6)은 수요

가 링에 포함되면 노드 쌍간 수요는 링에 포함됨을 의미한다. 마지막으로 식 (7)과 (8)은 노드 간에 발생하는 수요가 OXC 쌍에 포함되면 선택된 노드는 OXC로 연결됨을 의미한다.

모델 RM은 OADM 비용과 OXC 비용, 그리고 OXC 연결 비용을 최소로 구축하는 망을 설계한다. 상업용 패키지인 CPLEX 7.0 [1]을 이용하여 노드가 15개인 문제를 풀어본 결과 제한시간 1,000초 내에 해를 구할 수 없다. 실제에서 망 설계 문제는 비용 요소와 불확실한 트래픽을 고려해서 다양한 시나리오로 구성해야 한다. 또한, 통신회사에서 고려하는 시나리오는 1,000개 이상이므로 제한된 시간 내에 문제를 풀고, 좋은 해를 찾는 효율적인 휴리스틱이 중요하게 된다.

III. 타부 서치 휴리스틱

타부 서치 휴리스틱은 문제의 조합론적인 특성을 이용해서 이동 (Move)을 정한 뒤 타부메모리를 이용하여 해를 개선하는 메타 휴리스틱이다 [18]. 그러므로, 문제 특성을 이용해서 국지적인

$$RM: \text{Minimize } \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \alpha_k x_{ik} + \sum_{i, j \in N} \sum_{s, t \in M} \beta_{ijst} y_{ijst} + \sum_{s \in M} r_s z_s$$

Subject to

$$\sum_{i \in N} x_{ik} \leq l^a \quad \text{for all } k \in K, \tag{1}$$

$$\sum_{(i, j) \in E} d_{ij} f_{ijk} \leq b^a \quad \text{for all } k \in K, \tag{2}$$

$$\sum_{k \in K} f_{ijk} + \sum_{s, t \in M} y_{ijst} = 1 \quad \text{for all } (i, j) \in E, \tag{3}$$

$$\sum_{(i, j) \in E} \sum_{t \in M} d_{ij} y_{ijst} \leq b^s z_s \quad \text{for all } s \in M, \tag{4}$$

$$f_{ijk} \leq x_{ik} \quad \text{for all } (i, j) \in E, k \in K, \tag{5}$$

$$f_{ijk} \leq x_{jk} \quad \text{for all } (i, j) \in E, k \in K, \tag{6}$$

$$y_{ijst} \leq z_s \quad \text{for all } (i, j) \in E, s, t \in K, \tag{7}$$

$$y_{ijst} \leq z_t \quad \text{for all } (i, j) \in E, s, t \in K, \tag{8}$$

$$f_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \text{for all } (i, j) \in E, k \in K,$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \text{for all } i \in N, k \in K,$$

$$y_{ijst} \in \{0, 1\} \quad \text{for all } (i, j) \in E, s, t \in M$$

$$z_s \in \{0, 1\} \quad \text{for all } s \in M.$$

최적해(Local Optimum)를 벗어나 다른 영역을 탐색하여 전체 최적해(Global Optimum)를 구할 수 있다. 최적해를 구하기 위해 메모리를 단기 메모리와 장기 메모리로 나눈 뒤 반복실행 시간과 메모리 저장 시간 그리고 타부 속성을 정한다. 단기 메모리 흐름은 먼저 시작해를 정한 뒤 이동을 이용하여 현재 해에서 새로운 해를 찾는 과정을 거친다. 새로운 해가 이전 해보다 우수하면 최선해(Best Solution)로 메모리에 저장하고, 지정한 반복 실행 기간에 최선해를 얻으면 프로그램을 종료하거나 장기 메모리 과정으로 이동한다.

한편, 장기 메모리 전략은 단기 메모리에서 저장된 최선해 정보를 기반으로 분산(Diversification) 전략과 강화(Intensification) 전략으로 나뉜다. 강화 전략은 좋은 해를 찾을 수 있는 지역을 집중적으로 탐색하면서 이동(Move) 선택 조건을 수정하여 목적함수를 향상시키는 전략이다. 목적 함수를 향상시키는 장기 메모리 전략 중에 선택한 지역을 탐색한 뒤 다른 지역에서 새로운 조건으로 탐색하는 분산 탐색 전략이 있다. 분산 탐색 전략은 메모리에 저장되지 않은 지역을 탐색하거나 메모리에 저장된 횟수가 적은 지역을 탐색하는 방법이다. 단기와 장기 전략을 이용하여 망 설계 시나리오를 제한된 시간 내에 풀 수 있다. 제한된 시간 내에 문제를 해결하기 위해 3가지 세부 과정을 거친다. 3가지 세부 과정은 초기해, 향상해, 타부 서치 과정이다.

초기해 과정

초기해 과정은 3 단계로 이루어진다. 1 단계로 연결된 노드 개수가 가장 많은 노드를 선택하고, 2 단계로 선택된 노드와 연결된 노드 사이의 트래픽이 큰 순서로 링을 구성한다. 3 단계에서 노드의 최대 수와 파장 수를 만족하는지 확인하고, 노드의 최대 수와 파장 수를 초과하면 링을 새로 만든다. 끝으로, 서로 다른 링에 있는 노드간 수요를 만족시키기 위해 OXC를 설치한다.

개선해(Local Improvement Solution) 과정

초기해에서 얻은 망 구조를 기반으로 비용이 개선된 해를 찾는다. 개선해는 서로 다른 두 개의 링을 비교한 뒤 노드 쌍을 교환해서 비용이 준 해

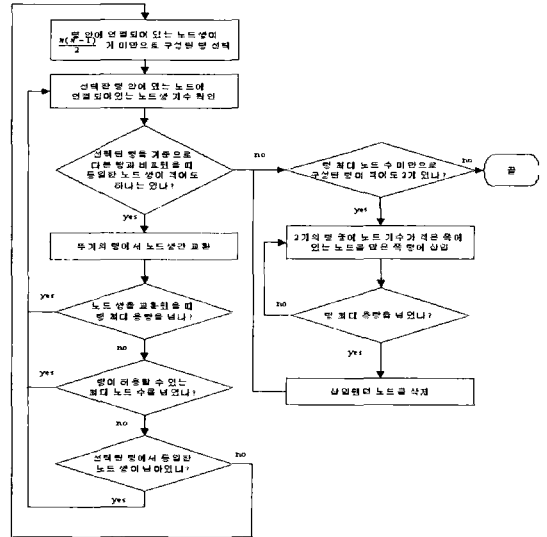


그림 3. 개선해 구하는 흐름도

를 구한다. 그림 3은 개선해를 구하는 흐름도를 보여준다. 1 단계에서 링이 처리할 수 있는 최대 트래픽과 최대 노드 수를 넘지 않는 링을 선택한 뒤, 선택한 링 사이에 노드 쌍을 교환한다. 2 단계에서 노드 쌍을 교환한 뒤, 제약 조건을 넘지 않는 링이 더 이상 존재하지 않으면 향상해 과정을 마친다. 개선해 과정을 통해 구한 해를 타부 서치 휴리스틱을 이용하여 단기 메모리와 장기 메모리 과정을 진행한다.

단기 메모리 (Short Term Memory)

개선해 과정을 통해 얻은 최선해를 시작해로 정하고 링에 오랫동안 포함되어 있던 수요쌍을 이웃해로 정의한다. 그리고, 노드 쌍을 이동할 때마다 노드간 트래픽을 포함하는 노드 쌍을 타부로 정의한다. 단기 메모리에서 사용하는 이동은 3가지로 노드 삽입 이동, 노드 삭제 이동, 교환 이동이 있다.

노드 삽입 이동은 링에 포함할 수 있는 최대 노드 수 보다 적게 구성된 링을 선택한 뒤, OXC에 연결된 노드 쌍 중 비용이 가장 큰 노드 쌍을 선택한다. OXC에서 선택한 노드 쌍을 최대 노드 수 미만으로 구성된 링에 삽입한 뒤, 트래픽을 링에 포함하여 링 최대 트래픽을 넘는지 확인한다. 다

음으로 노드 삭제 이동은 링에 포함된 노드 중 연결된 노드 수가 가장 적은 노드를 선택한 뒤, OXC에 연결한다. 마지막으로 교환 이동은 링에 포함된 노드 쌍이 모두 연결되지 않은 링을 선택한 뒤, 연결된 노드 개수가 1개인 노드를 선택한다.

장기 메모리 (Long Term Memory)

삽입, 삭제, 교환 이동을 기억하고 있는 단기 메모리를 기반으로 장기 메모리를 진행한다. 장기 메모리는 단기 메모리에서 저장된 정보를 기반으로 분산과 강화 탐색 전략을 수행한다. 강화 탐색 전략은 메모리에 저장된 노드 쌍과 OXC에 연결된 노드 쌍을 이용한다. 메모리에 장기간 머물렀던 노드 쌍을 순서대로 선택하여 OXC 연결 비용이 큰 노드쌍과 비교한 뒤 향상된 해를 정한 기간동안 메모리에 저장한다. 분산 탐색 전략은 링과 OXC 사이, OXC와 링 사이, 서로 다른 OXC 사이의 세가지 경우로 나누어 탐색하는 방법이다. 그림 4에서 (1)은 링에서 OXC로 이동하는 과정을 보여준다. OXC 중에 처리용량이 작은 OXC를 선택한 뒤, 처리 용량이 가장 큰 링을 선택한다. 처리 용량이 가장 큰 링에 포함된 노드 쌍 간 트래픽이 가장 큰 노드쌍을 선택하여 OXC에 연결된 노드 쌍과 교환한다. 그림 4에서 (2)는 OXC에서 링으로 이동하는 과정을 나타낸다. 여러 개의 링 중 처리 용량이 가장 작은 링을 선택한 뒤, 여러 개의 OXC 중 처리 용량이 가장 큰 OXC를 선택한다. 처리 용량이 가장 큰 OXC에 연결된 노드쌍간 트래픽이 가장 작은 노드 쌍을 선택하여 링에 포함된 노드 쌍과 교환한다. 마지막으로 그림 4에서 (3)은 서로 다른 OXC 사이에 이동하는 과정을 나타낸다. 서로 다른 OXC 사이의 분산은 각각의 OXC에 연결된 노드 쌍을 교환하여 더 이상 교환할 노드 쌍이 없을 때 까지 실행한다. 이 세가지 과정은 각각 확률 값을 주어 실행과정 동안 랜덤하게 프로그램을 실행한다. 그림 4에서 타부 서치는 확률 구간을 3개로 나누어 발생하는 확률 값에 따라 링과 OXC 사이, OXC와 링 사이, 서로 다른 OXC 사이의 노드 쌍 간 트래픽을 교환한다.

열망 조건 (Aspiration Criterion)

열망 조건은 해를 찾는 과정에서 단기 메모리에 의해 타부로 정의된 이동을 해 향상에 적용하

는 기준을 말한다. 타부인 수요쌍 이동이 현재를 일정 수준 (20%) 이상 개선시킬 때, 수요쌍 이동을 허용한다. 열망 조건을 충족한 이동은 타부에서 제외한다.

지금까지 타부 서치 휴리스틱 과정을 정리하면 다음과 같다. 초기해 과정에서 링 위주로 망을 설계하고, 향상해는 초기해에서 구한 망 정보를 이

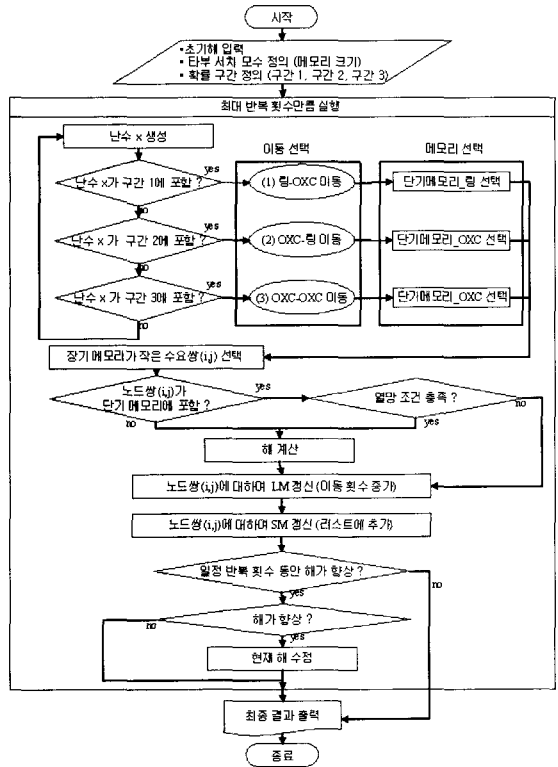


그림 4. 타부 서치 휴리스틱 흐름도

용하여 노드 쌍 간 트래픽을 교환하면서 초기해보다 비용이 줄어드는 해를 찾는다. 비용이 줄어드는 해를 찾기 위해 서로 다른 링에서 노드쌍간 트래픽을 교환한 뒤에는 타부 서치 휴리스틱을 이용하여 링과 OXC 사이, OXC와 링 사이, OXC 사이에 노드쌍간 트래픽을 교환하며 우수해를 찾는다. 이 세 가지 과정을 거쳐 나온 휴리스틱과 상업용 패키지인 CPLEX 7.0을 비교한 결과를 IV장에서 보여준다.

IV. 실험 결과

개발한 휴리스틱의 성능을 실험하기 위해서

OADM 비용, OXC 비용, OXC 연결 비용과 트래픽을 정의한다. OADM 비용, OXC 비용, OXC 연결비용은 1에서 50 사이에 임의의 값을 주고, 트래픽은 1에서 10까지 임의의 값을 준다. 각 링에 포함된 OADM 개수는 5개에서 10개 사이로 정하며, 링의 개수는 전체 트래픽을 링에 포함할 수 있는 최대 트래픽으로 나눈 뒤올림해서 구한다. 주어진 링 개수와 OADM, OXC, OXC 연결 비용을 이용하여 구성한 노드 12개 이하의 망 설계 문제는 CPLEX 7.0으로 1,000초 안에 풀린다. 개발한 휴리스틱과 CPLEX 결과는 팬티엄 IV 2GHz CPU, 256Mb 메모리 PC를 이용하여 구한다. 결과는 표1에 보여주며 계산 시간은 초로 나타낸다. 표 1과 2의 용어에 대한 정의는 아래와 같다.

- |N|, |E| : 노드 수, 노드 쌍 수
- TB 타부 서치로 구한 최선 해,
- RM 모델 RM을 CPLEX로 구한 최선 해,
- T_TB 타부 서치로 해를 구하는데 걸린 시간 (초),
- T_RM CPLEX로 해를 구하는데 걸린 시간 (초).

표 1에서 Gap은 CPLEX 7.0을 이용해서 구한 최선 해와 타부 서치를 이용해서 구한 해와 최적 해의 상대 오차 값을 나타낸다.

$$Gap(\%) = \frac{|타부서치 목적함수값 - CPLEX 7.0 목적함수값|}{CPLEX 7.0 목적함수값} \times 100$$

표 1은 노드 개수 10~12개인 문제를 실행한 결과를 보여준다. 표 1에서 타부서치 휴리스틱으로 구한 해와 CPLEX 7.0로 구한 해와 상대 오차가 3% 이내로, 타부서치 휴리스틱의 우수함을 보여준다.

표 1. 실행 결과 (노드 10~12개)

N	E	초기해	TB	RM	T_TB	T_RM	Gap (%)
10	45	77	56	55	5	105.50	1.82
10	45	77	56	55	5	176.09	1.82
10	45	92	72	70	5	43.13	2.86
10	45	77	58	57	5	201.70	1.75

10	45	79	61	60	5	270.37	1.67
10	45	89	57	57	5	142.24	0.00
10	45	89	59	58	5	109.20	1.72
10	45	91	52	51	5	365.06	1.96
10	45	89	63	62	5	80.06	1.61
10	45	65	54	53	5	93.26	1.89
12	66	99	78	76	5	561.89	2.63
12	66	99	69	69	5	152.44	0.00
12	66	90	64	63	5	99.20	1.59
12	66	79	60	59	5	893.25	1.69
12	66	93	79	77	5	593.15	2.60
12	66	99	74	73	5	762.05	1.37
12	66	105	87	85	5	871.11	2.35
12	66	108	100	98	5	602.08	3.06
12	66	97	79	78	5	558.56	1.28
12	66	100	76	75	5	606.00	1.33

표2는 노드 개수가 15개 이상인 문제는 CPLEX 7.0으로 제한 시간 1,000초 내에 최적해를 찾을 수 없음을 보여준다.

표 2. 실행 결과 (노드 15~50개)

N	E	초기해	TB	RM	T_TB	T_RM
15	105	246	224	285	5	1000*
15	105	267	246	281	5	1000*
15	105	258	243	274	5	1000*
15	105	293	280	315	5	1000*
15	105	222	202	236	5	1000*
20	190	504	479	511	5	1000*
20	190	399	382	415	5	1000*
20	190	449	423	449	5	1000*
20	190	573	534	567	5	1000*
20	190	585	577	612	5	1000*
25	300	709	534	558	5	1000*

25	300	808	668	714	5	1000*
25	300	810	672	698	5	1000*
25	300	904	783	801	5	1000*
25	300	785	631	659	5	1000*
30	435	1283	1047	1103	5	1000*
30	435	1293	1065	1993	5	1000*
30	435	1423	1229	1284	5	1000*
30	435	1115	841	885	5	1000*
30	435	1447	1237	1270	5	1000*
50	1225	2155	1807	1875	5	1000*
50	1225	2356	2140	2197	5	1000*
50	1225	2701	2486	2531	5	1000*
50	1225	2367	2203	2268	5	1000*
50	1225	2706	2474	2504	5	1000*

V. 결론

이 논문은 파장 분할 다중화 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 기법을 이용하여 링-그물 구조를 가진 망을 설계하는 알고리즘을 제시한다. 링-그물 망을 설계하는 문제는 OADM과 OXC 비용을 최소화 하면서 트래픽을 만족시키는 그물 라우팅과 링 토폴로지를 구한다. 링 토폴로지와 그물 라우팅 문제를 동시에 해결하기 위해서 정수 계획법을 이용하여 수학 모델을 개발한다. 링-그물 문제는 NP-Hard이므로 실제 크기의 망 문제에서 최적해를 구하기 어렵다. 따라서, 문제를 풀기 위해 타부 서치 휴리스틱을 제안한다. 타부 서치 휴리스틱 성능을 상업용 패키지인 CPLEX 7.0으로 구한 해와 비교한 결과, 5초 내에 최적해와 상대 오차가 3% 이내인 우수해를 구했다.

참고 문헌

[1] Cplex 7.0, ILOG, 2001.
 [2] Sarah D. Dods, "A Comparison of the Homodyne Crosstalk Characteristics of Optical Add-Drop Multiplexers," *Journal of Lightwave*

Technology, Vol. 19, No. 12, 1829 -1838, 2001.
 [3] Michel Gendreau, Martine Labbe, Gilbert Laporte, "Efficient Heuristics for the Design of Ring Networks," *Telecommunication Systems*, Vol. 4, 177-188, 1995.
 [4] W. D. Grover, John Doucette, "Topological Design of Survivable Mesh-based Transport Networks," *Annals of Operations Research*, Vol. 106, 79-125, 2001.
 [5] W. D. Grover, John Doucette, "A Novel Heuristic for Topology Planning and Evolution of Optical Mesh Networks," *Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '01, IEEE*, Vol. 4, 2169 2173, 2001.
 [6] W. D. Grover, R. R. Irashko, Y. Zheng, "Comparative Methods and Issues in Design of Mesh-Restorable STM and ATM Networks," *Chapter 10, Telecommunication Network Planning*, Kluwer Academic Publishers, 169-200, 1999.
 [7] Chretien G. P. Herben, Xaveer J. M. Leijtens, Peter Maat, Hans Blok, "Crosstalk Performance of Intergrated Optical Cross-Connects," *Journal of Lightwave Technology*, 1126 -1134, 1999.
 [8] Pin-Han Ho, H.T. Mouftah, "Issues on Diverse Routing for WDM Mesh Networks with Survivability," *Computer Communications and Networks*, 61-66, 2001.
 [9] Taehan Lee, Kyungsik Lee, Sungsoo Park, "Optimal Routing and Wavelength Assignment in WDM Ring Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 10, 2146 -2154, 2000.
 [10] Youngho Lee, Jeonghee Han, Kugchang Kang, "A Fiber Routing Problem in Designing Optical Transport Networks with Wavelength Division Multiplexed Systems," *INFORMS National Meeting*, San Antonio, TX, U.S.A. November 5-8, 80, 2000.
 [11] Youngho Lee, Hanif D. Sherali, Junghee Han, Seong-in Kim, "A Branch-and-Cut Algorithm for Solving an Intraring synchronous Optical Network Design

- Problem," Networks, Vol. 35, No. 3, 223-242, 2000.
- [12] G. David Morley, "Tabu Search Optimization of Optical Ring Transport Networks," Global Telecommunications Conference, Vol. 4, 2160-2164, 2001.
- [13] G. D. Morley, W. D. Grover, "A Comparative Survey of Methods for Automated Design of Ring-based Transport Networks," TRILabs Technical Report, January 28, 1998.
- [14] G. D. Morley, W. D. Grover, "Current Approaches in the Design of Ring-based Optical Networks," IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, 220 -225, 1999.
- [15] W. V. Parys, "Cost Boundaries for Economical OXCs," Optical Fiber Communication Conference, Vol. 3, 216 218, 2000.
- [16] Izhak Rubin, Jing Ling, "All-Optical Cross-Connect Meshed-ring Communications Networks using a Reduced Number of Wavelengths," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, 924-931, 1999.
- [17] Shiragaki, "Optical Cross-Connect System Incorporated with Newly Developed Operation and Management System," Vol. 16, No. 7, 1179-1189, 1998.
- [18] Dilek Tuzun, Laura I. Burke, "A Two-phase Tabu Search Approach to the Location Routing Problem," European Journal of Operational Research, Vol. 116, 87-99, 1999.
- [19] L. Wuttisittikulij, "Design of a WDM Network using a Multiple Ring Approach," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, No. 3, 551-555, 1997.
- [20] Korea Network Information Center, 2002.
- [21] 노선식, 윤승진, 김영찬, "WDM Ring에서 SONET ADM 수를 최소화하기 위한 트래픽 그루밍 알고리즘," 한국통신학회지, Vol.25, No. 5B, 956-965, 2000.
- [22] 정노선, 안기석, 홍상기, 홍종일, 강철신, "Mesh 구조의 WDM 기간망 구조 설계," 한국통신학회지, Vol.25, No. 5, 889-898, 2000.

이 영 호 (Youngho Lee)



1984년 2월: 서울대학교
산업공학과 졸업
1986년 2월: 서울대학교
산업공학과 석사
1992년 9월: Virginia Tech.
USA 산업공학 박사
1992년 9월 ~ 1997년 2월:

미국 US WEST Advanced Technologies,
Distinguished Member Technical Staff
1997년 3월 ~ 현재: 고려대학교 산업시스템정보
공학과 정교수

<주관심 분야> 통신경영, 통신시스템, 금융공학, 수
리최적화

박 보 영 (Boyoung Park)



1998년 2월: 서울산업대학교
산업공학과 졸업
2003년 2월: 고려대학교 산업
시스템정보공학과 석사
2003년 2월 ~ 현재:
LGTeleCom 정보기술실
<주관심 분야> 네트워크 설계,

통신경영, 금융공학

박 노 익 (Noik Park)

한국전자통신연구원 광대역통합망연구단 통합망전략
연구그룹 BcN설계팀

이 순 석 (Soonsuk Lee)

한국전자통신연구원 광대역통합망연구단 통합망전략
연구그룹 BcN설계팀

김 영 부 (Youngbu Kim)

한국전자통신연구원 광대역통합망연구단 통합망전략
연구그룹 BcN설계팀

조 기 성 (Kisung Cho)

한국전자통신연구원 광대역통합망연구단 통합망전략
연구그룹 BcN설계팀