

# 그물구조 WDM 망 설계 알고리즘과 망 설계 시스템 연구

이영호\* · 장용원\* · 박노익\*\* · 이순석\*\* · 김영부\*\* · 조기성\*\*

## A New Algorithm for Designing WDM Mesh Networks

Youngho Lee\* · Yongwon Chang\* · Noik Park\*\*  
Soonsuk Lee\*\* · Youngbu Kim\*\* · Kisung Cho\*\*

### ■ Abstract ■

In this paper, we deal with a mesh network design problem arising from the deployment of WDM for the optical internet. The mesh network consists of mesh topology for satisfying traffic demand while minimizing the cost of WDM, OXC, and fiber cables. The problem seeks to find an optimal routing of traffic demands in the network such that the total cost is minimized. We formulate the problem as a mixed-integer programming model and devise a tabu search heuristic procedure. Also we develop an optical internet design system that implements the proposed tabu search heuristic procedure. We demonstrate the computational efficacy of the proposed algorithm, compared with CPLEX 8.0.

Keyword : Network Design, Path Protection, Mesh Topology, OXC, WDM

## 1. 서 론

국내 인터넷 이용자 수는 1998년 310만 명에서 2003년 2,861만 명으로 증가했다[4]. 인터넷 사용 인구 증가에 따른 트래픽 증대로 기간 전송망에서 대역폭 부족 문제가 발생했고, 파장 분할 다중화 기술

(Wavelength Division Multiplexing, WDM)의 대용량 광 전송망(Optical Transport Network)이 해결책으로 제시되었다[10]. 대용량 전송으로 부각된 망의 생존성 보장 문제를 해결하기 위해 OXC(Optical Cross Connect)를 이용한 그물 구조 WDM망이 등장하였다[13, 15]. 링 구조망에 비해 그물 구조망

논문접수일 : 2004년 2월 12일      논문게재확정일 : 2004년 10월 5일

\* 고려대학교 산업시스템정보공학과

\*\* 한국전자통신연구원

은 용량 증설시 경제적인 구조로 인식되고 있다[9]. 또한, 그물 구조 WDM망은 특정 링크에서 연결이 끊어져도 망의 생존성을 보장하기 위해서 다른 링크를 이용하여 트래픽을 전송 할 수 있다.

망의 생존성을 보장하는 방법은 링크보호방식과 경로보호방식으로 구분된다. 링크보호방식은 망의 링크에 고장이 발생했을 때 해당 링크에 인접한 노드 사이에서 대체 경로를 설정한다[5]. 반면, 경로보호방식은 링크 고장이나 노드의 문제로 영향을 받은 경우에 경로의 시작노드와 끝노드에서 대체 경로를 설정한다[8]. 망의 특성에 따라서 경로보호는 링크보호에 비해 15%에서 45%까지 파장 이용의 향상된 효율성을 보인다[12].

경로보호방식은 전용보호방식(Dedicated Path Protection)과 공유보호방식(Shared Path Protection)으로 구분된다. 전용보호방식은 주경로와 보조 경로에서 다른 수요쌍과 파장을 공유하지 않는다. 반면, 공유보호방식은 동일 수요쌍에서 주경로와 보조경로 사이에 파장을 공유할 수 없지만, 보조경로는 다른 수요쌍의 보조경로와 파장을 공유할 수 있다. 공유보호방식은 파장을 공유하기 때문에 전용보호방식보다 비용이 적게 든다[13]. 전용보호방식과 공유보호방식을 비교하면 망 생존성 측면은 전용보호방식이 우수하고, 망 설계 비용 측면은 공유보호방식이 우수하다.

이 논문은 전용보호방식과 공유보호방식으로 비용을 최소화 하는 망 설계 알고리즘을 제안한다. 여기서, 실제 망(Physical Network)에서 정적인 수요(Static Demand)가 주어지고, 파장전이(Wavelength Conversion)를 허용한 상태에서, WDM과 OXC의 위치 선정(Location), 경로 설계와 파장 할당(Routing and Wavelength Assignment) 문제를 해결한다. 이 논문은 생존성 보장 방법으로 경로보호방식을 선택하며, 전용보호방식과 공유보호방식을 다룬다. 망 설계에 따른 비용요소로 WDM 비용, OXC 비용과 케이블 비용을 고려한다. 그리고 알고리즘이 내장된 망 설계 시스템을 개발한다.

그물 구조 WDM망 설계 문제에 대해서 정노선,

안기선[3]이 그물 구조의 차세대 전광 WDM 기간 망의 구조를 설계한 연구가 있다. 이 연구는 링크 단절과 같은 장애 발생시 생존성이 보장되는 망 구조를 설계했다. 이창형, 이형일[2]은 그물 구조 기반 파장 분할 다중화 망의 최적 용량 배치 기법을 연구했다. 이 연구는 생존성 보장 방법으로 부분 경로 복구 기법을 제시했다. 하지만 알고리즘의 적용범위가 규모가 작은 망의 경우로 한정되어 노드와 링크가 많은 망 설계 문제에는 적용할 수 없다. 한편 Grover and Doucette[7]는 망의 생존성을 보장하기 위해 링크 보호(Link Protection) 방법으로 경로를 설계했다. 이 논문에서 연구한 링크 보호 방법은 망에 문제가 발생했을 때 실시간으로 보조경로를 설계하기 때문에 문제가 발생한 링크 주위에 다른 링크도 문제가 발생하면 망의 생존성을 보장할 수 없는 경우가 발생한다. Pin-Han Ho and H.T. Mouftah [11]는 Short Leap Shared Protection 방법을 이용하여 수요 예측을 기반으로 한 그물 구조 WDM망의 생존성을 보장하는 경로설계 문제를 풀었다. 이 연구는 장비비용에 대한 고려가 없기 때문에 망 설계 비용 문제를 해결할 수 없다. 기존 논문의 이러한 문제점을 해결하고, 서울망 같은 크고 복잡한 망에도 적용할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

이 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 그물 구조 WDM 망 설계 문제의 정수 계획법 모델을 제시하고 3장은 그물 구조 WDM 망 설계 알고리즘을 제안한다. 4장은 실험 결과를 설명하고 5장은 알고리즘이 내장된 망 설계 시스템을 설명한다. 끝으로 6장은 이 연구의 결론, 활용방안과 추후 연구 과제를 제시한다.

## 2. 문제 정의와 수학모형

그물 구조 WDM망 설계 문제 정의에 필요한 집합과 모수는 다음과 같다.

- $N$  : 노드 집합,
- $E$  : 링크 집합,

- $W$  : 파장의 집합,
- $K$  : WDM 장비의 종류 집합,
- $L$  : OXC 장비의 종류 집합,
- $d_{i,j}$  : 노드  $i$ 와 노드  $j$  사이 트래픽(Lightpath의 수),
- $\alpha_{i,j}$  : 링크  $(i, j)$ 의 거리 비용,
- $\beta_{i,j}^k$  : 링크  $(i, j)$ 에 설치한 타입  $k$ 의 WDM 비용,
- $\gamma_j^l$  : 노드  $j$ 에 설치한 타입  $l$ 의 OXC 비용,
- $a^k$  : 타입  $k$ 의 WDM 용량,
- $b^l$  : 타입  $l$ 의 OXC 용량.

망 설계에 필요한 의사 결정 변수를 정의하면 다음과 같다. 수요쌍  $(s, d)$ 의 주경로가 링크  $(i, j)$ 를 지나고 파장  $w$ 를 사용하면  $x_{i,j}^{s,d,w} = 1$ 이고 아니면 0이다. 수요쌍  $(s, d)$ 의 보조경로가 링크  $(p, q)$ 를 지나고 파장  $w$ 를 사용하면  $s_{p,q}^{s,d,w} = 1$ 이고 아니면 0이다. 수요쌍  $(s, d)$ 의 주경로에 속한 링크  $(i, j)$ 가 문제가 생겨서, 트래픽이 보호링크  $(p, q)$ 를 지나고 파장  $w$ 를 사용하면  $\delta_{p,q,i,j}^{s,d,w} = 1$ 이고 아니면 0이다. 링크  $(p, q)$ 가 망에서 보호링크로 파장  $w$ 를 사용하면  $m_{p,q}^w = 1$ 이고 아니면 0이다. 링크  $(i, j)$ 에 타입  $k$ 의 WDM이 설치되면  $y_{i,j}^k = 1$ 이고 아니면 0이다. 노드  $j$ 에 타입  $l$ 의 OXC가 설치되면  $z_j^l = 1$ 이고 아니면 0이다.

전용보호 설계 문제 수식을 모델 MDP라 부르고, 이 문제를 정수계획법(Integer Programming)으로 표현하면 다음과 같다.

**MDP : Minimize**

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} \sum_{(i,j) \in E} \alpha_{i,j} x_{i,j}^{s,d,w} + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \beta_{i,j}^k y_{i,j}^k + \sum_{l \in L} \sum_{j \in N} \gamma_j^l z_j^l$$

**subject to**

$$\sum_{w \in W} \sum_{(i,s) \in E} x_{i,s}^{s,d,w} - \sum_{w \in W} \sum_{(s,k) \in E} x_{s,k}^{s,d,w} = -2 \times d_{s,d} \quad \forall s, d \in N, (1)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{(i,d) \in E} x_{i,d}^{s,d,w} - \sum_{w \in W} \sum_{(d,k) \in E} x_{d,k}^{s,d,w} = 2 \times d_{s,d} \quad \forall s, d \in N, (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{i,j}^{s,d,w} - \sum_{(j,k) \in E} x_{j,k}^{s,d,w} = 0, \quad \forall j \in N (j \neq s, j \neq d), \forall s, d \in N, \forall w \in W, (3)$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} x_{i,j}^{s,d,w} + \sum_{s \in N} \sum_{d \in N} x_{j,i}^{s,d,w} \leq 1, \quad \forall (i, j) \in E, \forall w \in W, (4)$$

$$\sum_{w \in W} x_{i,j}^{s,d,w} + \sum_{w \in W} x_{j,i}^{s,d,w} \leq d_{s,d}, \quad \forall (i, j) \in E, \forall s, d \in N, (5)$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} x_{i,j}^{s,d,w} + \sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} x_{j,i}^{s,d,w} \leq \sum_{k \in K} a^k y_{i,j}^k + \sum_{k \in K} a^k y_{j,i}^k, \quad \forall (i, j) \in E, (6)$$

$$\sum_{k \in K} y_{i,j}^k + \sum_{k \in K} y_{j,i}^k \leq 1, \quad \forall (i, j) \in E, (7)$$

$$\sum_{l \in L} z_j^l \leq 1, \quad \forall j \in N, (8)$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} \sum_{(i,j) \in E} x_{i,j}^{s,d,w} \leq \sum_{l \in L} b^l z_j^l, \quad \forall j \in N, (9)$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} \sum_{(i,j) \in E} x_{j,i}^{s,d,w} \leq \sum_{l \in L} b^l z_j^l, \quad \forall j \in N, (10)$$

$$x_{i,j}^{s,d,w} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in E, \forall s, d \in N, \forall w \in W, \\ y_{i,j}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in E, \forall k \in K, \\ z_j^l \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in N, \forall l \in L.$$

모델 MDP에서 식 (1), 식 (2)와 식 (3)은 흐름 방정식을 의미한다. 식 (1)은 출발점의 흐름방정식이고 식 (2)는 종착점의 흐름 방정식이며 식 (3)은 중간 지점의 흐름 방정식이다. 식 (4)는 파장  $w$ 가 다른 경로와 공유할 수 없음을 의미한다. 식 (5)는 링크에서 사용하는 파장 종류의 합이 임의의 수요 값보다 작거나 같아야 함을 의미한다. 식 (6)은 링크에서 사용하는 WDM의 용량은 링크에서 사용하는 파장의 합보다 같거나 커야함을 의미한다. 식 (7)은 링크에 한 종류의 WDM이 설치됨을 의미하고, 식 (8)은 노드에 한 종류의 OXC가 설치됨을 의미한다. 식 (9)는 노드로 들어오는 수요의 합이 설치된 OXC의 처리 용량보다 작거나 같아야 함을 의미하고, 식 (10)은 노드에서 나가는 수요의 합이 설치된 OXC의 처리 용량보다 작거나 같아야 함을 의미한다.

공유보호 설계 문제 수식을 모델 MSP라 부르고, 이 문제를 정수계획법(Integer Programming)으로 표현하면 다음과 같다.

### MSP : Minimize

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} \sum_{(i,j) \in E} a_{i,j} (x_{i,j}^{s,d,w} + s_{i,j}^{s,d,w}) + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \beta_{i,j}^k y_{i,j}^k + \sum_{l \in L} \sum_{j \in N} \gamma_j^l z_j^l$$

### subject to

$$\sum_{w \in W} \sum_{(s,e) \in E} x_{s,e}^{s,d,w} = d_{s,d}, \quad \forall s, d \in N,$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{(i,d) \in E} x_{i,d}^{s,d,w} = d_{s,d}, \quad \forall s, d \in N,$$

$$x_{i,s}^{s,d,w} = 0, \quad \forall (i,s) \in E, \forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$x_{d,e}^{s,d,w} = 0, \quad \forall (d,e) \in E, \forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{i,j}^{s,d,w} - \sum_{(j,e) \in E} x_{j,e}^{s,d,w} = 0,$$

$$\forall j \in N (j \neq s, j \neq d), \forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$\sum_{w \in W} x_{i,j}^{s,d,w} = \sum_{w \in W} \sum_{(s,e) \in E} \delta_{s,e,i,j}^{s,d,w},$$

$$\forall (i,j) \in E, \forall s, d \in N,$$

$$\sum_{w \in W} x_{i,j}^{s,d,w} = \sum_{w \in W} \sum_{(p,d) \in E} \delta_{p,d,i,j}^{s,d,w},$$

$$\forall (i,j) \in E, \forall s, d \in N,$$

$$\delta_{p,s,i,j}^{s,d,w} = 0,$$

$$\forall (p,s), (i,j) \in E, \forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$\delta_{d,e,i,j}^{s,d,w} = 0,$$

$$\forall (d,e), (i,j) \in E, \forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$\sum_{(p,q) \in E} \delta_{p,q,i,j}^{s,d,w} - \sum_{(q,e) \in E} \delta_{q,e,i,j}^{s,d,w} = 0,$$

$$\forall q \in N (q \neq s, q \neq d), \forall (i,j) \in E, w \in W,$$

$$\delta_{i,j,i,j}^{s,d,w} = 0, \quad \forall (i,j) \in E, \forall s, d \in N, w \in W,$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \delta_{p,q,i,j}^{s,d,w} \leq 1,$$

$$\forall (p,q), (i,j) \in E, \forall s, d \in N, w \in W,$$

$$m_{p,q}^w \leq \sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{(i,j) \in E} \delta_{p,q,i,j}^{s,d,w},$$

$$\forall (p,q) \in E, \forall w \in W,$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{(i,j) \in E} \delta_{p,q,i,j}^{s,d,w} \leq |N| \times |N| \times |E| \times m_{p,q}^w,$$

$$\forall (p,q) \in E, \forall w \in W,$$

$$m_{i,j}^w + \sum_{s \in N} \sum_{d \in N} x_{i,j}^{s,d,w} \leq 1, \quad \forall (i,j) \in E, \forall w \in W,$$

$$s_{p,q}^{s,d,w} \leq \sum_{(i,j) \in E} \delta_{p,q,i,j}^{s,d,w},$$

$$\forall (p,q) \in E, \forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$\sum_{(i,j) \in E} \delta_{p,q,i,j}^{s,d,w} \leq |E| \times s_{p,q}^{s,d,w},$$

$$\forall (p,q) \in E, \forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$\sum_{(s,e) \in E} s_{s,e}^{s,d,w} \leq \sum_{(s,e) \in E} x_{s,e}^{s,d,w},$$

$$\forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} x_{i,j}^{s,d,w} + \sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} s_{i,j}^{s,d,w} +$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} x_{j,i}^{s,d,w} + \sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} s_{j,i}^{s,d,w} \leq$$

$$\sum_{k \in K} a^k y_{i,j}^k + \sum_{k \in K} a^k y_{j,i}^k, \quad \forall (i,j) \in E,$$

$$\sum_{k \in K} y_{i,j}^k + \sum_{k \in K} y_{j,i}^k \leq 1, \quad \forall (i,j) \in E,$$

$$\sum_{l \in L} z_j^l \leq 1, \quad \forall j \in N,$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} \sum_{(i,j) \in E} x_{i,j}^{s,d,w} +$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} \sum_{(i,j) \in E} s_{i,j}^{s,d,w} \leq \sum_{l \in L} b^l z_j^l, \quad \forall j \in N,$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} \sum_{(j,i) \in E} x_{j,i}^{s,d,w} +$$

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N} \sum_{w \in W} \sum_{(j,i) \in E} s_{j,i}^{s,d,w} \leq \sum_{l \in L} b^l z_j^l, \quad \forall j \in N,$$

$$s_{p,q}^{s,d,w} \in \{0, 1\}, \quad \forall (p,q) \in E, \forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$\delta_{p,q,i,j}^{s,d,w} \in \{0, 1\},$$

$$\forall (i,j), (p,q) \in E, \forall s, d \in N, \forall w \in W,$$

$$m_{p,q}^w \in \{0, 1\}, \quad \forall (p,q) \in E, w \in W.$$

모델 MDP와 MSP를 CPLEX 8.0[6]을 이용하여 수요쌍이 10개인 전용보호문제를 풀어본 결과 주어진 시간(7,200초) 내에 최적해 또는 가능해를 구할 수 없었다. 이론적으로 문제 MDP와 MSP의 복잡도는 NP-Hard이다. 실제 망 설계 문제는 비용 요소와 불확실한 트래픽을 고려해서 다양한 시나리오로 구성해야 한다. 다양한 시나리오를 평가하려면 제한된 시간 내에 좋은 해를 구할 수 있어야 한다. 하지만 CPLEX와 같은 상업용 패키지를 이용하면 실제 망 설계 문제에서 제한된 시간 내에 좋은 해

를 구할 수 없다. 따라서 시나리오별로 다양한 망 설계 문제를 제한된 시간 내에 좋은 해를 찾는 휴리스틱이 필요하다.

### 3. 그물 구조 WDM 망 설계 알고리즘

망 설계 알고리즘은 전용보호알고리즘과 공유보호알고리즘으로 구성되고, 두 알고리즘 모두 초기해 과정, 초기해 향상과정과 타부서치 과정을 거친다. 초기해 과정에서 구한 해는 초기해 향상과정에서 향상 해를 찾은 뒤, 타부서치 과정을 통해 최선해를 구한다.

#### 3.1 초기해과정(Initial Solution Procedure)

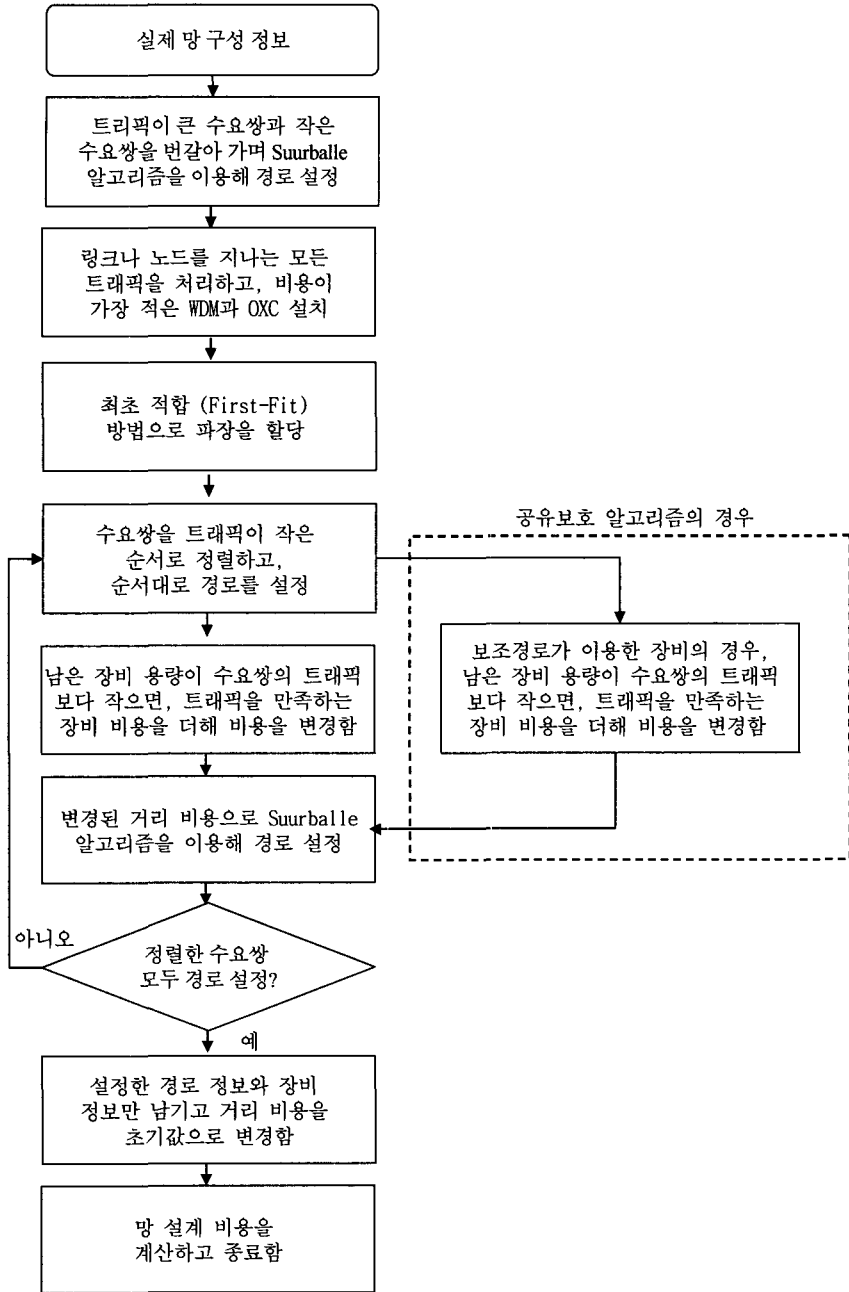
초기해 과정은 망에 발생한 수요쌍을 정렬한 뒤 트래픽이 큰 수요쌍과 작은 수요쌍을 번갈아 가며 경로를 설정한다. 경로 설정에 사용하는 각 링크와 노드에 선택된 수요를 처리할 만한 용량이 있는 경우에는 거리비용만을 고려하며, 그렇지 않은 경우에는 수요를 처리하는 데 필요한 장비 비용을 거리비용에 합산한다.

구체적으로 초기해 알고리즘을 설명하면 [그림 1]과 같다. 단계 1은 망의 수요쌍 가운데, 트래픽이 큰 수요쌍과 작은 수요쌍을 번갈아 가며 Suurballe 알고리즘[14]을 이용해 주경로와 보조경로를 설정하고, 장비를 설치한 뒤 파장을 할당한다. 이때 경로를 설정할 수요쌍은 2개 이상으로 정하고, Suurballe 알고리즘에 의해 주경로와 보조경로가 어떤 경우에도 겹치지 않게 설정한다. WDM과 OXC는 링크나 노드를 지나는 모든 트래픽을 처리하고, 비용이 가장 적은 장비를 설치하며, 파장은 최초 적합 방식(First-Fit)으로 할당한다. 단계 2는 단계 1에서 경로를 설정하고 남은 수요쌍을 트래픽이 작은 순서로 정렬한다. 단계 3은 단계 1에서 설치된 장비를 이용하기 위해, 장비비용을 반영한 값으로 거리비용을 변경한다. 이와 같은 링크의 비용 변경은 장비

의 여유 용량이 충분한 경로로 다음 수요쌍의 주경로와 보조경로가 설정되게 한다. 거리 비용은 경로를 설정할 수요쌍이 링크를 지나가는 경우, 설치된 장비의 용량으로 충분한 경우는 비용을 변경하지 않고 부족한 경우는 용량을 만족하는 장비비용 값을 더해 변경한다. 예를 들어 링크에 남아있는 WDM 용량이 3이고, 경로를 설정할 수요쌍의 트래픽이 2이면 최초 거리 비용에 0을 더한다. 만약 경로를 설정할 트래픽이 5이면 용량을 만족하는 장비 비용을 더한다. 단계 4는 거리 비용이 변경된 망을 이용하여 Suurballe 알고리즘으로 수요쌍의 경로를 설정하고, 단계 5는 경로 설정을 하지 않은 수요쌍이 있는지 확인해서, 경로를 설정하지 않은 수요쌍이 있으면 단계 3으로 이동하고, 없으면 단계 6을 실행한다. 단계 6은 거리비용이 변경된 망의 거리비용을 초기값으로 바꾼 뒤, 전 단계에 설정된 경로를 이용해 장비를 설치하고 파장을 할당한다. 한편, 공유보호 알고리즘은 단계 5와 단계 6 사이에 다른 수요쌍의 보조경로와 파장을 공유할 수 있는 과정을 거친다.

#### 3.2 초기해 향상 과정(Local Improvement Procedure)

전용보호알고리즘의 초기해 향상 과정은 설치된 장비를 최적으로 사용하는 방향으로 해를 개선한다. [그림 2](a)는 초기해 향상 과정을 보여준다. 단계 1은 초기해에서 망에 설치된 장비의 남은 용량을 계산한다. 단계 2는 수요가 적은 순서로 수요쌍을 정렬한다. 단계 3은 정렬된 순서대로 경로 설정 순서를 정하고, 단계 4는 망에 설치된 장비 정보를 이용해 경로를 설정할 수요쌍의 트래픽보다 WDM의 사용가능한 용량이 같거나 많이 남아있는 링크만 표시한다. 단계 5는 표시한 링크를 이용해 경로를 설정할 수 있는지 확인하고, 경로설정이 가능하면, 새로운 경로를 설정한 뒤, 단계 6은 초기해와 비교하여 해가 향상되었으면 저장하고, 그렇지 않으면 저장하지 않는다. 만약 단계 5에서 경로 설정



[그림 1] 초기해 과정

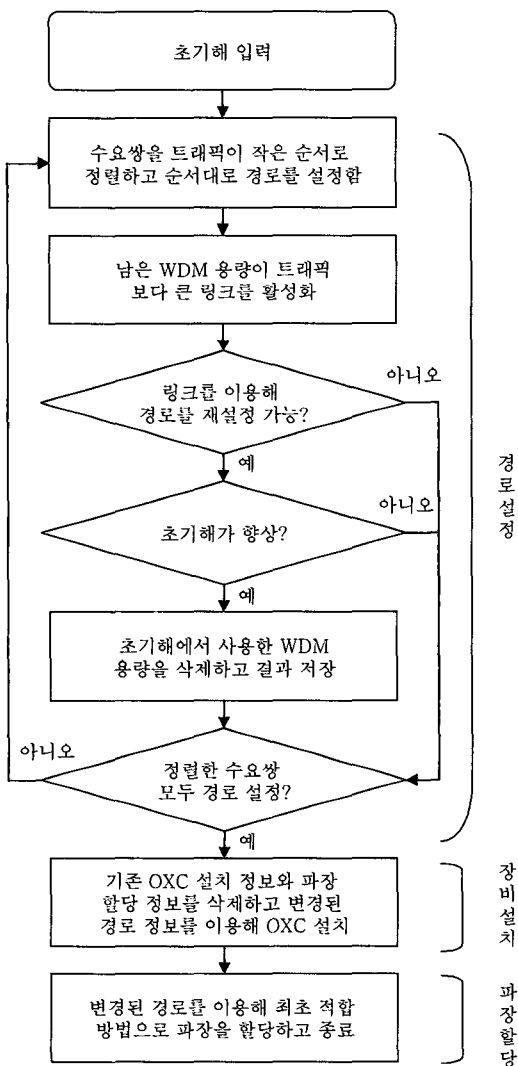
이 불가능하면, 모든 수요쌍의 경로가 설정됐는지 확인하는 단계 7로 이동한다. 단계 8은 모든 수요쌍의 경로 설정 정보를 이용해, 노드에 트래픽을 만족시키면서 비용이 가장 싼 OXC를 새롭게 설치하고,

단계 9는 최초 적합 방식을 이용해 파장을 할당한다.

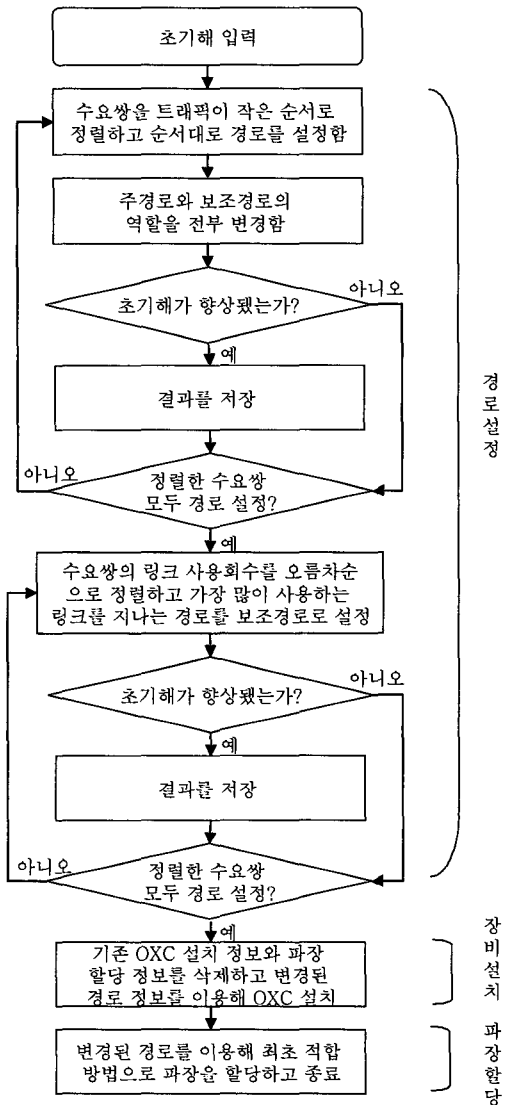
한편, 공유보호알고리즘의 초기해 향상과정은 초기해에서 구한 수요쌍의 주경로와 보조경로를 교환해서 향상해를 구한다. 공유보호의 경우, 다른 수요

쌍의 보조경로와 파장을 공유할 수 있으므로, 보조 경로를 많이 공유할 수 있는 경로를 찾는다. 초기해 향상 과정은 [그림 2](b)와 같이 이루어지며, 주경로와 보조경로의 역할 변경은 경로의 역할을 모두 변경하는 방법과 일부 구간의 역할을 변경하는 방법이 있다. 먼저 경로 전체의 역할을 바꾸는 방법의 순서는 다음과 같다. 역할을 변경할 수요쌍을 선택하고, 주경로와 보조경로의 역할을 바꾼다. 역할을

변경해서 해를 향상시키면, 변경된 경로를 저장한다. 주경로와 보조경로의 일부 구간의 역할을 변경하는 경우는 다음과 같다. 먼저 망에서 많이 사용하는 링크를 순서대로 나열하고, 많이 사용하는 링크를 지나는 경로를 보조경로로 설정한다. 역할을 변경해서 해를 향상시키면 변경된 경로를 저장한다. 저장한 경로를 이용해 트래픽을 만족시키면서 비용이 가장 싼 장비를 새롭게 설치하고 파장을 할당한다.



(a) 전용보호 문제



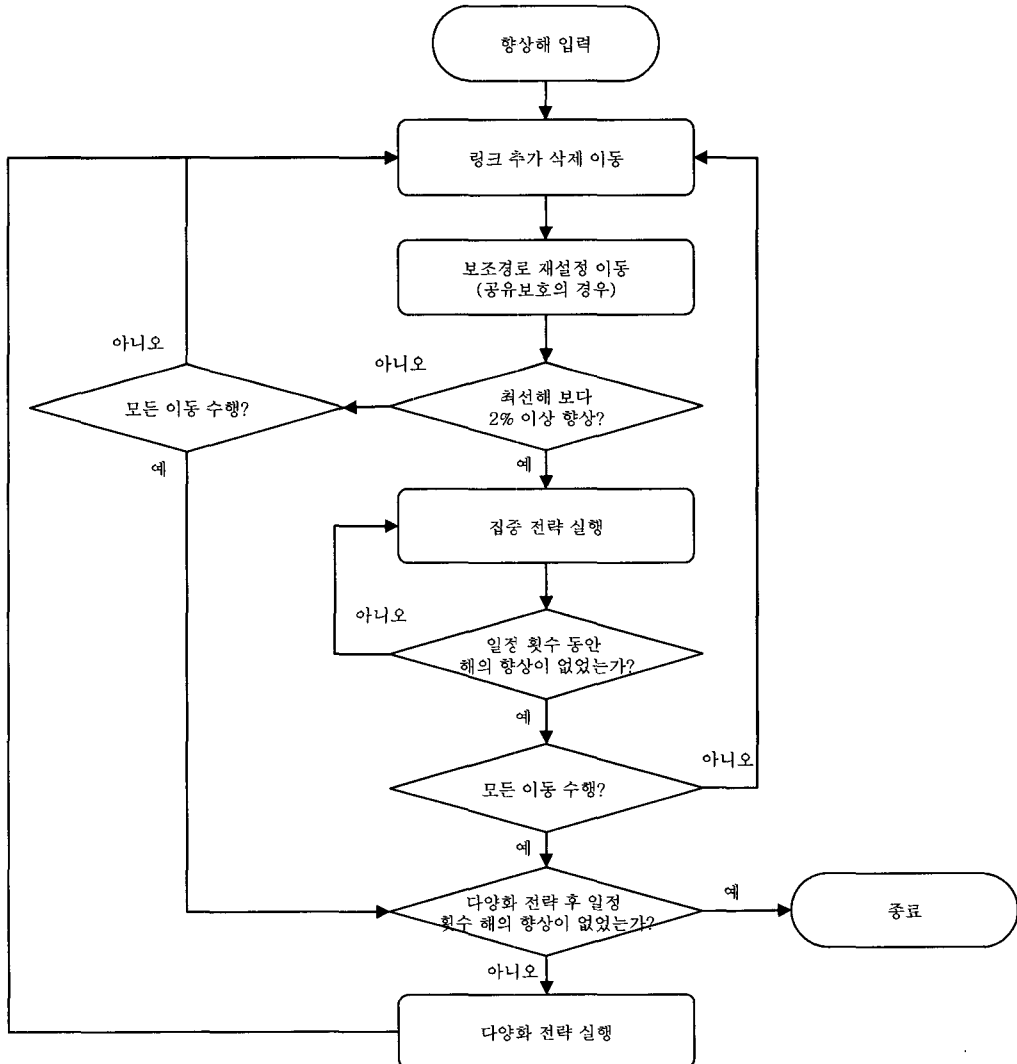
(b) 공유보호 문제

[그림 2] 초기해 향상 과정

### 3.3 타부 서치 과정(Tabu Search Procedure)

타부 서치 과정은 [그림 3]과 같이 초기해 향상과정의 결과를 이용해 단기 메모리 과정과 장기메모리 과정을 거치면서 해를 향상시킨다. 단기 메모리 과정은 이동(Move)을 이용해 해를 찾는다. 이동에는 링크 추가-삭제이동과 보조경로 재설정 이동이 있다. 링크 추가 삭제 이동은 전용보호알고리즘과 공유보호알고리즘 모두에서 사용하지만, 보조경로 재설정 이동은 공유보호알고리즘만 사용한다. 즉

전용보호 알고리즘은 링크 추가 삭제 이동만 실행하고 공유보호알고리즘은 링크 추가, 삭제 이동과 보조경로 재설정 이동을 순차적으로 실행한다. 집중 탐색 전략(Intensification Search Strategy)은 단기메모리 과정 중에 실행하고, 분산 탐색 전략(Diversification Search Strategy)은 장기 메모리 과정에 중에 실행한다. 집중 탐색 전략은 단기 메모리 과정에서 이동을 실행하는 동안 특정 이동이 최선해를 2%이상 향상 시키면, 링크에 저장된 트래픽 정보 가운데 트래픽이 많은 링크에 어드벤처



[그림 3] 타부 서치 과정



(Advantage) 주고, 이웃해의 크기를 늘려 링크 추가-삭제 이동을 실행한다. 반대로 분산 탐색 전략은 메모리에 저장된 링크 사용 정보 가운데 트래픽이 많은 링크에 별점을 부여해 탐색하지 않은 곳에 있을 수 있는 최선해를 찾는다.

3.3.1 이동과 이웃해(Move and Neighborhood)

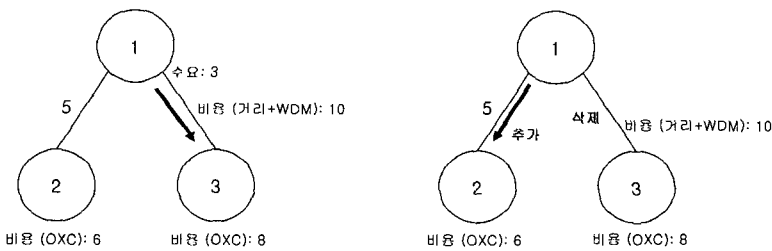
이동은 현재해에서 이웃해를 찾는 규칙이다. 이 논문에는 해를 향상하기 위해 링크 추가-삭제 이동과 보조경로 재설정 이동을 정의했다. 링크 추가-삭제 이동은 [그림 4]와 같다. 먼저 경로를 재설정하려는 수요쌍을 선택한다. 다음 해당 수요쌍이 초기해 향상 과정을 통해 찾은 경로에서 비용을 가장 크게 발생시키는 링크를 삭제한 뒤에, 삭제한 링크 끝에서 종착 노드까지 망 설계 비용을 최소화 하는 경로를 찾는다. 이동한 뒤에 해가 향상되면 경로를 저장한다.

보조 경로 재설정 이동은 공유보호알고리즘에서 사용되며 [그림 5]와 같다. 먼저 보조 경로를 재설정 하는 이동을 실행하기 위해 트래픽이 적은 순서로 수요쌍을 선택하고, 초기해 과정을 통해 저장되었던 경로 설정 정보와 장비 설치 정보를 삭제한다. 그리고 망에 설치된 링크를 지나는 다른 수요쌍의

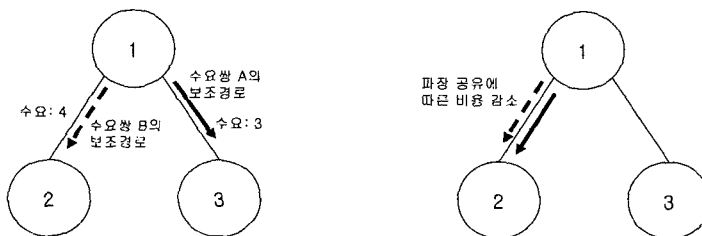
보조 경로 정보를 이용해 링크의 거리비용을 변경한다. 예를 들어, 다른 수요쌍의 보조경로에서 사용하는 파장수가 보조경로를 재설정하려는 수요쌍의 파장 수보다 크면, 공유보호방법은 파장을 공유할 수 있으므로 거리비용을 변경하지 않는다. 만약 다른 수요쌍의 보조경로에서 사용하는 파장수가 보조 경로를 재설정하려는 수요쌍의 파장 수보다 작으면 파장 수 차이만큼 거리비용을 더한다. 위와 같이 변경된 망을 이용해 수요쌍의 보조 경로를 재설정한다. 보조경로를 재설정해서 해가 향상되면 저장한다. 한편, 링크 추가, 삭제 이동과 보조경로 재설정 이동을 이용해 현재해에서 타부이동이 아니거나 타부이동이지만 열망수준을 만족하는 이동에 대해 이웃해를 생성한다.

3.3.2 열망 수준(Aspiration Level)

열망 수준은 실행하려는 이동이 타부리스트에 저장되어 있는 경우, 일정 수준이상 해를 향상시키면 타부조건을 무시하고 이동을 실행할 수 있는 조건을 말한다. 열망 수준은 해결하려는 문제에 따라 달라지며, 이 논문은 해를 개선시키면 타부리스트를 무시하고 이동할 수 있도록 정했다.



[그림 4] 링크 추가-삭제 이동



[그림 5] 보조 경로 재설정 이동

### 3.3.3 타부조건(Tabu Condition)

타부조건은 최근에 실행한 이동을 타부이동으로 규정하고, 타부이동의 반복 실행을 방지하여 효율적으로 해를 찾을 수 있도록 한다. 타부이동은 타부 목록에 저장되고, 저장된 이동의 반복 실행을 방지해서 싸이클(Cycle) 현상을 막는다. 이 논문의 경우, 전용보호알고리즘과 공유보호알고리즘의 타부리스트 크기를 7로 설정했다.

### 3.3.4 집중 탐색 전략(Intensification Search Strategy)

집중 탐색 전략은 단기메모리 과정 실행 중에 수행한다. 단기 메모리 과정에서 이동을 실행하는 동안 특정 이동이 최선해를 2%이상 향상 시키면, 링크에 저장된 트래픽 정보 가운데 트래픽이 많은 링크에 어드밴티지를 주고, 이웃해의 크기를 늘려 링크 추가-삭제 이동을 실행한다. 이 논문에는 트래픽이 많은 링크 가운데 상위 10%의 링크를 선택한 뒤, 링크의 조합을 통해 여러 가지 경우를 생성하고 각 경우에 링크 비용을 싸게 하는 어드밴티지를 준 뒤 수요쌍의 경로를 설정해 집중 탐색 전략을 수행한다. 일정 횟수 동안 해의 개선이 없으면 다시 단기 메모리에 과정으로 이동해 해를 찾는다.

### 3.3.5 분산 탐색 전략(Diversification Search Strategy)

분산 탐색 전략도 집중 탐색 전략과 같이 링크를 지나는 트래픽 정보를 이용해 수행하지만 적용 방법이 다르다. 분산 탐색 전략은 새로운 해공간을 탐색하기 위해 링크에 저장된 트래픽 정보 가운데 트래픽이 많은 링크에 페널티를 주고 수요쌍의 경로를 설정한다. 이 논문에는 집중 탐색 전략과 같이 상위 10%의 링크를 선택하고 링크의 조합을 통해 여러 가지 경우를 생성한 뒤 각 경우에 링크 비용을 비싸게 하는 벌점을 주고 수요쌍의 경로를 설정해 분산 탐색 전략을 수행한다. 분산탐색을 수행한 후에는 다시 단기메모리 과정으로 이동해 해를 찾는다.

### 3.3.6 정지조건(Stop Criterion)

이 논문에는 분산 탐색 과정을 거친 뒤, 단기 메모리를 수행한 결과 일정 횟수 동안 해가 향상 되지 않으면 알고리즘을 종료하는 방법을 사용했다.

## 4. 실험 결과

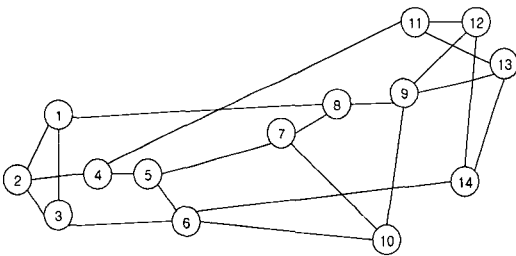
개발한 알고리즘의 성능을 실험하기 위해 망 토폴로지, WDM 비용, OXC 비용, 거리 비용과 트래픽을 정의한다. 망 토폴로지는 NSF-NET(National Science Foundation Network), EON(European Optical Network)과 서울 망을 사용한다. 망 토폴로지에 WDM비용과 OXC비용을 입력하고, 수요쌍의 트래픽은 1에서 5까지 값(Uniform Distribution)을 랜덤 생성해 실험한다. WDM은 16 채널을 처리하는 WDM 비용을 5에서 10까지 랜덤 생성한다. 그리고 WDM 32은 WDM 16의 채널 당 처리 비용 \* 0.95 \* 32, WDM 64는 WDM 16의 채널 당 처리 비용 \* 0.92 \* 64를 계산하여 구하고, WDM 96은 WDM 16의 채널 당 처리 비용 \* 0.88 \* 96을 계산하여 비용을 구한 뒤에 소수점 첫째자리에서 반올림해서 사용했다. OXC는 16×16 채널을 처리하는 OXC 비용을 5에서 10까지 랜덤 생성한다. 그리고 OXC 32×32는 OXC 16×16의 채널당 처리비용 \* 0.95 \* 32, OXC 64×64는 OXC 16×16의 채널당 처리비용 \* 0.92 \* 64를 계산하여 구하고 OXC 96×96은 OXC 16×16의 채널당 처리비용 \* 0.88 \* 96을 계산하여 비용을 구한 뒤에 소수점 첫째자리에서 반올림해서 사용했다. 거리 비용은 실제거리를 소수점 첫째자리에서 반올림하여 사용했다. 알고리즘 계산에 사용된 실험 장비는 CPU 속도 1.7GHz, 메모리 512메가바이트 컴퓨터이다. 망 설계 시스템의 성능은 CPLEX 8.0[6]과 비교해 측정한다. 계산 시간은 초로 나타내며, 표에 쓰이는 용어 정의는 아래와 같다.

- P : 수요쌍 수,
- TB : 타부 서치로 구한 목적함수 값(총 비용),
- CPLEX : CPLEX로 구한 목적함수 값(총 비용),

- GAP :  $(|TB - CPLEX| / CPLEX) * 100(\%)$ ,
- T\_TB : 타부 서치 시간(초),
- T\_CPLEX : CPLEX 시간(초).

4.1 NSF-NET

NSF-NET은 [그림 4]와 같이 14개 노드와 11개 링크를 가지고 있다[10]. 수요쌍을 10개부터 20개까지 5개씩 증가시켜 15문제를 실험한다. 수요쌍의 개수가 20개를 초과하는 경우를 실험하지 않는 이유는 예비 실험 결과 CPLEX 8.0을 이용해 2시간 이내에 어떤 값도 얻지 못하는 경우가 많이 발생했기 때문이다. 전용보호 알고리즘 실험과 공유보호 알고리즘 실험은 같은 데이터를 이용한다.



[그림 4] NSF-NET

<표 1>은 NSF-NET을 이용해 수요쌍을 변경시켜 구한 전용보호 알고리즘 실험 결과이다. 실험 결과 CPLEX 8.0은 모든 실험에서 7,200초 안에 최적해를 못 구했으며, <표 1>에 제시된 결과는 제한 시간(7,200초)까지 구한 가능해의 목적함수 값이다. 반면, 망 설계 시스템은 최대 8초 내에 CPLEX 8.0이 구한 가능해보다 총 비용이 최대 7% 더 좋은 해를 구했다.

<표 2>는 NSF-NET을 이용해 수요쌍을 변경시켜 구한 공유보호 알고리즘 실험 결과이다. 실험 결과 CPLEX 8.0은 문제 1에서 문제 5까지 제한된 시간 안에 가능해만 구했고, 수요쌍의 개수가 15개 이상이 되면 제한 시간 내에 어떤 해도 못 구했다. 반면 망 설계 시스템은 최대 8초 이내에 CPLEX 8.0이 구한 가능해보다 총 비용이 최대 7% 더 좋은 해를 구했다.

<표 1> NSF-NET 전용보호 알고리즘 실험 결과

TEST	P	TB	CPLEX	GAP	T_TB	T_CPLEX
1	10	1,288	1,291	4.9	5	7,200
2	10	1,565	1,629	3.9	5	7,200
3	10	1,938	2,021	4.1	5	7,200
4	10	1,120	1,172	4.4	5	7,200
5	10	1,300	1,342	3.1	5	7,200
6	15	1,573	1,649	4.6	7	7,200
7	15	1,899	2,012	5.6	7	7,200
8	15	2,418	2,570	5.9	7	7,200
9	15	1,491	1,602	6.9	7	7,200
10	15	1,622	1,716	5.5	7	7,200
11	20	2,316	2,430	4.7	8	7,200
12	20	2,438	2,599	6.2	8	7,200
13	20	2,834	3,051	7.1	8	7,200
14	20	2,024	2,172	6.8	8	7,200
15	20	2,260	2,402	5.9	8	7,200

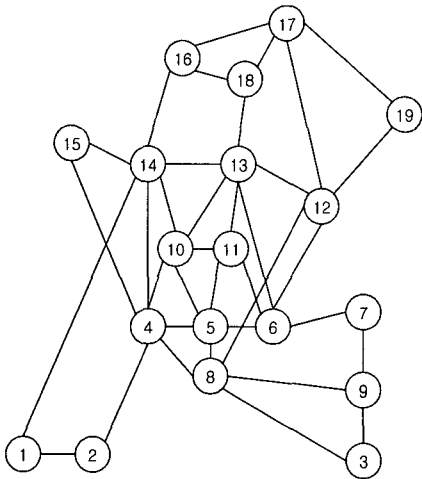
<표 2> NSF-NET의 공유보호 알고리즘 실험 결과

TEST	P	TB	CPLEX	GAP	T_TB	T_CPLX
1	10	1,199	1,272	5.7	5	7,200
2	10	1,512	1,619	6.6	5	7,200
3	10	1,923	2,033	5.6	5	7,200
4	10	1,073	1,160	7.4	5	7,200
5	10	1,204	1,299	7.3	5	7,200
6	15	1,407	-	-	7	7,200
7	15	1,697	-	-	7	7,200
8	15	2,115	-	-	7	7,200
9	15	1,371	-	-	7	7,200
10	15	1,459	-	-	7	7,200
11	20	2,084	-	-	8	7,200
12	20	2,135	-	-	8	7,200
13	20	2,479	-	-	8	7,200
14	20	1,830	-	-	8	7,200
15	20	1,938	-	-	8	7,200

4.2 EON(European Optical Network)

EON은 [그림 5]와 같이 노드 19개와 링크 22개를 가지고 있다[1]. 수요쌍은 10개부터 20개까지 5개씩

증가시켜 15문제를 실험한다. EON은 NSF-NET보다 복잡하기 때문에, 수요쌍이 20개를 초과하는 경우는 실험하지 않는다. 전용보호알고리즘 실험과 공유보호알고리즘 실험은 같은 데이터를 이용한다.



[그림 5] EON

<표 3> EON의 전용보호 알고리즘 실험 결과

TEST	P	TB	CPLEX	GAP	T_TB	T_CPLEX
1	10	2,499	2,684	6.9	6	7,200
2	10	1,488	1,585	6.1	6	7,200
3	10	1,788	1,931	7.4	6	7,200
4	10	1,995	2,150	7.2	6	7,200
5	10	1,835	1,901	8.5	6	7,200
6	15	3,495	3,710	7.5	8	7,200
7	15	2,168	2,284	7.0	8	7,200
8	15	2,389	2,571	7.5	8	7,200
9	15	2,717	2,840	8.9	8	7,200
10	15	2,478	2,667	7.7	8	7,200
11	20	3,947	-	-	10	7,200
12	20	2,645	-	-	10	7,200
13	20	3,295	-	-	10	7,200
14	20	3,381	-	-	10	7,200
15	20	3,541	-	-	10	7,200

<표 3>은 EON을 이용해 수요쌍을 변경시켜 전용보호 방식으로 실험한 결과이다. 실험 결과

CPLEX 8.0은 문제 1부터 문제 10까지 제한된 시간 내에 가능해만 구했으며, 수요쌍의 개수가 20개일 경우, 7,200초 안에 어떤 해도 못 구하는 경우가 발생했다. 반면 망 설계 시스템을 이용해, 최대 10초 내에 CPLEX 8.0이 구한 가능해보다 총 비용이 최대 9% 더 좋은 해를 구했다.

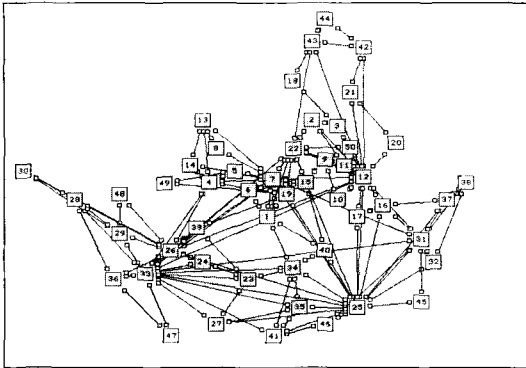
<표 4>는 EON을 이용해 수요쌍을 변경시켜 공유보호 방식으로 실험한 결과이다. 실험 결과 CPLEX 8.0은 문제 2와 문제 5에서 제한된 시간 내에 가능해만 구했으며, 15개 실험 가운데 13개 문제를 7,200초 안에 가능해도 못 구했다. 반면 망 설계 시스템을 이용해, 최대 10초 내에 CPLEX 8.0이 구한 가능해보다 총 비용이 최대 8% 더 좋은 해를 얻었다.

<표 4> EON의 공유보호 알고리즘 실험 결과

TEST	P	TB	CPLEX	GAP	T_TB	T_CPLEX
1	10	2,276	-	-	6	7,200
2	10	1,478	1,610	8.2	6	7,200
3	10	1,622	-	-	6	7,200
4	10	1,845	-	-	6	7,200
5	10	1,729	1,871	7.6	6	7,200
6	15	2,972	-	-	8	7,200
7	15	1,973	-	-	8	7,200
8	15	2,082	-	-	8	7,200
9	15	2,246	-	-	8	7,200
10	15	2,120	-	-	8	7,200
11	20	3,850	-	-	10	7,200
12	20	2,415	-	-	10	7,200
13	20	3,069	-	-	10	7,200
14	20	2,904	-	-	10	7,200
15	20	3,136	-	-	10	7,200

### 4.3 서울 망

서울 망은 [그림 6]과 같이 노드 50개와 링크 67개로 구성된다. 수요쌍은 10개부터 20개까지 5개씩 증가시켜 5문제씩 실험한다. 전용보호 실험과 공유보호 실험은 같은 수요쌍을 이용한다.



[그림 6] 서울 망 실험화면

<표 5>는 서울 망을 이용해 수요쌍을 변경시켜 전용보호 방식으로 실험한 결과이다. 실험 결과 CPLEX 8.0은 문제 2만 제한된 시간 내에 가능해를 구했으며, 나머지 14개 실험에서 7,200초 안에 해를 못 구했다. 반면 망 설계 시스템을 이용해, 총 비용이 최대 15초 내에 CPLEX 8.0이 구한 가능해보다 7% 더 좋은 결과를 얻었다.

<표 5> 서울 망의 전용보호 알고리즘 실험 결과

TEST	P	TB	CPLEX	GAP	T_TB	T_CPLEX
1	10	2,399	-	-	10	7,200
2	10	1,585	1,701	6.8	10	7,200
3	10	2,836	-	-	10	7,200
4	10	1,951	-	-	10	7,200
5	10	2,683	-	-	10	7,200
6	15	3,208	-	-	12	7,200
7	15	2,128	-	-	12	7,200
8	15	4,122	-	-	12	7,200
9	15	2,546	-	-	12	7,200
10	15	3,958	-	-	12	7,200
11	20	4,287	-	-	15	7,200
12	20	2,979	-	-	15	7,200
13	20	5,919	-	-	15	7,200
14	20	3,135	-	-	15	7,200
15	20	5,217	-	-	15	7,200

<표 6>은 서울 망을 이용해 수요쌍을 변경시켜 공유보호 알고리즘으로 실험한 결과이다. 실험 결

과 CPLEX 8.0은 모든 실험에서 7,200초안에 가능해 조차 구할 수 없었다. 망 설계 시스템을 이용해, 총 비용을 최대 15초 이내에 구했다.

<표 6> 서울 망의 공유보호 알고리즘 실험 결과

TEST	P	TB	CPLEX	GAP	T_TB	T_CPLEX
1	10	2,100	-	-	10	7,200
2	10	1,309	-	-	10	7,200
3	10	2,513	-	-	10	7,200
4	10	1,726	-	-	10	7,200
5	10	2,375	-	-	10	7,200
6	15	2,825	-	-	12	7,200
7	15	1,876	-	-	12	7,200
8	15	3,750	-	-	12	7,200
9	15	2,255	-	-	12	7,200
10	15	3,612	-	-	12	7,200
11	20	3,661	-	-	15	7,200
12	20	2,588	-	-	15	7,200
13	20	5,300	-	-	15	7,200
14	20	2,580	-	-	15	7,200
15	20	4,599	-	-	15	7,200

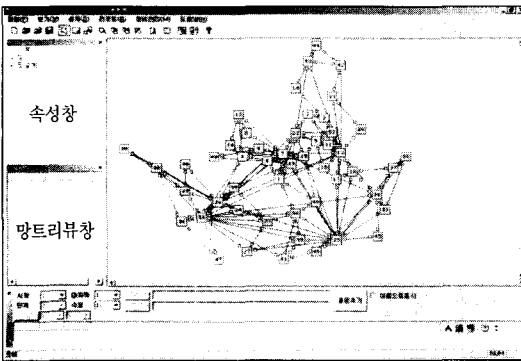
## 5. 광 인터넷 망 설계 시스템

개발한 전용보호알고리즘과 공유보호알고리즘이 내장된 망 설계 시스템에 대해 설명한다. 그물 구조 WDM망을 설계하는 시스템은 사용자에게 편의를 제공하기 위해 기본 정보 모듈, 망 구성 모듈과 결과 모듈로 구성된다.

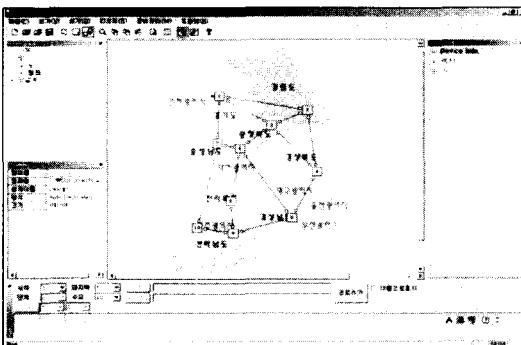
기본 정보 모듈은 망 설계를 위해 필요한 망 설계 정보, 장비 정보를 보여주고, 저장하는 기능을 한다. 기본 정보 모듈은 [그림 7]과 같이 메뉴바, 도구모음바, 캔버스, 망트리뷰창, 속성창, 그리고 장비 정보창으로 구성된다. 메뉴바는 파일, 보기, 설계, 리포트, 장비 관리, 도움말의 6개 메뉴로 구성된다. 도구모음바는 메뉴의 기능을 이용하기 쉽게 아이콘으로 표시해서, 메뉴바를 사용하지 않고 메뉴의 기능을 실행할 수 있다. 캔버스는 망 구성 현황을 볼 수 있다. 캔버스를 이용해 노드와 링크의 설치와 편

집, 장비설치 현황과 설계한 경로를 보여준다. 망트리뷰창은 망 설계 작업 내용을 트리 구조로 보여준다. 망트리뷰창을 이용해 망에 설치된 노드와 링크 연결내용과 경로 설계 내용을 볼 수 있다. 속성창은 망을 구성하는 구성 요소의 세부 정보를 보여준다. 속성창에는 지도이름, 지도파일, 설계이름, 설계방식, 지도크기와 같은 기본정보와 노드 이름, 위치, 설치된 OXC 정보, 입출력 정보와 같은 노드정보, 마지막으로 링크 이름, 거리 정보, 설치된 WDM 정보, 링크를 지나는 수요 정보와 같은 링크 정보를 볼 수 있다.

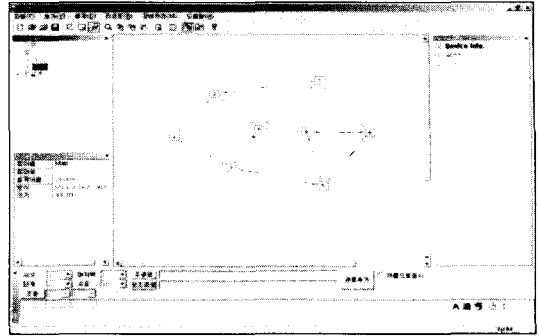
망 설계 모듈은 망 구성 메뉴, 경로 설정 메뉴, 장비설치와 파장할당 메뉴로 구성된다. 망 구성 메뉴는 노드와 링크로 망을 구성하는 기능을 한다. 그리고 [그림 8]과 [그림 9]와 같이 망 구성 화면을 선택할 수 있다. [그림 8]은 지도 정보를 이용하는 지



[그림 7] 망 설계도구 초기화면



[그림 8] 지도 설계 화면



[그림 9] 캔버스 설계 화면

도 설계방식이고, [그림 9]는 지도 정보 없이 망을 설계하는 방법이 캔버스 설계방식이다.

[그림 10]은 결과 모듈을 통해 얻은 망 설계 결과 화면이다. 결과 모듈은 장비 설치 위치와 가격, 경로 설계 내용과 거리비용을 표시한다. 이 모듈을 이용해 망 설계 내용을 알 수 있다. 망 설계자는 망 설계 결과를 이용해 망 구축 방향을 제시 할 수 있다.

장비	위치	개수	단가(단위:백만)	가격(단위:...
<b>방식 - 최적 DEDICATED</b>				
WDM1 (16)		7	16	112.0
성북-경동(LINK ID:7)		1		16
성북-성당(LINK ID:6)		1		16
신촌-광화문(LINK ID:12)		1		16
용산-광화문(LINK ID:1)		1		16
용산-원효(LINK ID:2)		1		16
원효-신촌(LINK ID:48)		1		16
청량-경동(LINK ID:25)		1		16
<b>WDM Total</b>				<b>112.0</b>
OXC1 (15x16)		3	20	60.0
광화문(ID:7)		1		20
원효(ID:19)		1		20
청량(ID:11)		1		20
OXC2 (30x30)		4	38	152.0
성북(ID:2)		1		38
신촌(ID:4)		1		38
용산(ID:1)		1		38
경동(ID:12)		1		38
<b>OXC Total</b>				<b>212.0</b>
경로[용산(ID:1)-신촌(ID:4)]				220.0
주요로	용산-원효		9.5 km	95.0
보조경로	원효-신촌		12.5 km	125.0

[그림 10] 망 설계 결과 화면

## 6. 결 론

이 논문은 파장 분할 다중화 기법을 이용하여 그물 구조 WDM망을 설계하는 알고리즘과 망 설계 시스템을 제시한다. 망 설계 시스템의 성능은

NSF-NET, EON과 서울망에 장비비용과 트래픽을 입력한 뒤, CPLEX 8.0의 결과와 비교해 평가했다. 망 설계 시스템을 이용하여 현실 사례를 분석한 결과, 7,200초 내에 CPLEX 8.0과 비교한 결과 제안한 알고리즘이 최대 15초 이내에 총 비용이 9% 더 좋은 해를 구한다. 구체적으로 살펴보면, NSF-NET에 수요쌍을 10개, 15개, 20개로 증가시켜 실험한 결과, 전용보호 알고리즘 실험에서 CPLEX 8.0은 제한된 시간 내에 가능해만 구했다. 반면 망 설계 시스템을 이용해 CPLEX 8.0이 7,200초 동안 구한 결과보다 최대 7% 좋은 결과를 8초 이내에 구했다. 공유보호알고리즘 실험도 CPLEX 8.0은 일부 실험에서만 가능해를 구했으며 수요쌍이 10개를 초과할 경우, 해를 못 구하는 경우가 발생했다. NSF-NET보다 노드 수와 링크 수가 많은 EON과 서울망의 경우, 전용보호 알고리즘 실험에도 CPLEX 8.0으로 7,200초 이내에 해를 못 구하는 경우가 발생했다. 추후 연구로, 이 문제를 해결하기 위해 그물 구조 WDM 망 설계 문제의 특성을 반영하여 최적해의 하한을 향상시키는 최적알고리즘 연구를 진행하고 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 박구현, 우재현, "WDM 광전달망에서 최소 파장 수를 갖는 경로설계 및 파장할당", 「한국통신학회논문지」, Vol.23, No.8(1998), pp.1883-1892.
- [2] 이창형, 이형일, 서승우, "매쉬 기반의 생존성 파장 분할 다중화망의 설계 기법", 「한국통신학회논문지」, Vol.26, No.2A(2001), pp.171-178.
- [3] 정노선, 안기석, 홍상기, 홍종일, 강철신, "Mesh 구조의 WDM 기간망 구조 설계", 「한국통신학회지」, Vol.25, No.5(2000), pp.889-898.
- [4] 한국인터넷정보센터, 2003년 상반기 정보화 실태 조사, 2003. 7.
- [5] Anderson, B.T. Doshi, S. Dravida and P. Harshavardhana, "Fast Restoration of ATM Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.12(1994), pp.128-138.
- [6] CPLEX 8.0 ILOG, 2003.
- [7] Grover, W.D. and J. Doucette, "Topological Design of Survivable Mesh-based Transport Networks," *Annals of Operations Research*, Vol.106(2001), pp.79-125.
- [8] Grover, W.D., T.D. Bilodeau and B.D. Venables, *Near Optimal Spare Capacity Planning in a Mesh Restorable Network*, In Proceedings of Globecom'91, Dec. 1991, pp.2007-2012.
- [9] Grover, W.D., R.R. Irashko and Y. Zheng, "Comparative Methods and Issues in Design of Mesh-Restorable STM and ATM Networks," Chapter 10, *Telecommunication Network Planning*, Kluwer Academic Publishers, 1999, pp.169-200.
- [10] Pin-Han Ho, H.T. Mouftah, "Allocation of Protection Domains in Dynamic WDM Mesh Networks," ICNP'02 Paris France, 2002, pp.188-189.
- [11] Pin-Han Ho and H.T. Mouftah, "Issues on Diverse Routing for WDM Mesh Networks with Survivability," ICCCN '01, 2001, pp. 61-66.
- [12] Kawamura, R., *Architectures for ATM Network survivability*, IEEE Communications Surveys, 1998.
- [13] Ramamurthy, S. and B. Mukherjee, "Survivable WDM mesh networks," in *Proceeding of IEEE INFOCOMM '99*, March 1999, pp.744-751.
- [14] Suurballe, J.W. and R.E. Tarjan, "A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths," *Networks*, Vol.14(1984), pp.325-336.
- [15] HUI ZANG, *WDM Mesh Networks Management and Survivability*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.