

# 파장 라우팅 WDM 망에서의 파장 경로 설정 방식

김 병재, 박 진식, 신 기수

한국통신 가입자망연구소 광통신연구팀

## A Wavelength Path Accommodation Method in Wavelength Routed WDM Networks

Byungjae Kim, Jinsik Park, Keysoo Shin

Access Network Research Lab Korea Telecom

### 요 약

WDM망을 구성하는데 있어서 광학적 파장은 가장 중요한 자원의 하나이다. 그러나 주어진 통신 요구를 모두 수용하면서 동시에 최소한의 파장만을 사용하는 WDM 망의 설계 문제는 이미 NP-complete 계열의 문제인 것으로 밝혀졌으며 많은 휴리스틱 알고리즘들이 제안되었다. 본 논문에서는 임의의 물리적 망 위상(topology)과 완전 연결(full connection)형태의 통신 요구가 주어질 경우, 요구되는 파장 경로(wavelength path, lightpath)를 확립하기 위한 방법으로써 각 노드 사이의 최단 거리 경로를 기반으로 하여 탐색 공간을 만들고 구성된 탐색 공간 내에서 branch-and-bound 탐색 방식을 수행하는 파장 경로 설정 알고리즘을 제안한다. Branch-and-bound 탐색 방식은 초기에 좋은 bound조건을 가질 경우 주어진 시간 안에 보다 넓은 탐색 공간을 검색할 수 있으므로 최초의 탐색에서 가능한 좋은 성능의 파장 경로 설정을 발견할 수 있어야 한다. 시뮬레이션 실험을 통하여 최초의 탐색에서 발견한 파장 경로 설정과 구성된 탐색 공간내의 최적해를 얻고, cut-set을 이용하여 요구 파장 개수의 하위 한계값을 계산한 후, 이를 상호 비교하여 제안된 알고리즘의 성능을 평가한다.

### 1. 개 요

급속히 증가하는 전송망의 대역폭에 대한 수요를 만족시키기 위하여 최근 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기술에 대한 많은 연구가 이루어졌다.[1,2] WDM망의 핵심 기술로는 다중화 가능한 파장의 수를 늘리 전송 라인의 대역폭을 확장하는 것, 각 노드의 처리 용량을 늘리고 파장 사용의 효율성을 높이기 위한 파장 라우팅(Wavelength Routing) 기술을 들 수 있다. 그러나 동시에 다중화 가능한 파장의 수에는 제한이 따르며 망의 건설비용을 절감하기 위해서도 최소 개수의 파장만을 사용하여 주어진 통신 요구를 만족시킬 수 있도록 망을 구성하여야 한다. 파장 경로의 라우팅 및 파장 할당 문제(RWA, Routing and Wavelength Assignment)는 이러한 최적화된 WDM망을 구성하는데 있어서 반드시 해결되어야 하는 문제이지만 이미 NP-complete 계열의 문제인 것으로 밝혀졌으며 따라서 망의 규모가 커질 경우 최적해를 구하기보다는 만족할만한 성능을 보이는 국부 최적해(suboptimal solution)를 구하기 위한 많은 휴리스틱 알고리즘들이 제안되었다.[3,4] RWA는 크게 파장 경로의 라우팅 결정과 각 경로에 대한 파장 할당 문제로 크게 나눌 수 있으며 요구되는 파장 개수의 최소화를 목표로 한다.

파장 경로의 라우팅 결정 문제는 파장 할당 문제를 고려하지 않은 경우 정수 제약(integer flow constraint)을 가진 다중 물류 흐름 문

제(multicommodity flow problem)와 동일하며 최대 밀집도(congestion)의 최소화를 목표로 한다.[1,4] 여기에서 밀집도는 하나의 광섬유(fiber) 링크를 지나가는 파장 경로의 수로 정의되며 최대 밀집도란 모든 광섬유 링크에 대해 그 밀집도의 최대값을 취한 것이다. 이러한 문제는 정수 선형 프로그램(integer linear program) 형태로 기술할 수 있으며 정수 제약으로 인하여 NP-complete 계열의 문제임이 알려져 있다. 파장 경로의 라우팅이 결정된 후 각 경로가 사용할 파장 대역이 할당된다.

각 경로에 대한 파장 할당에는 하나의 광섬유(fiber) 링크에서 동시에 다중화되는 경로들은 서로 다른 파장 대역을 할당받아야 한다는 제약과 하나의 파장 경로가 여러 광섬유 링크를 걸쳐서 형성될 경우 각각의 링크에서 모두 동일한 파장 대역을 할당받아야 한다는 제약(파장 연속성 제약, wavelength continuity constraint)이 있다. 최소한의 파장 개수만을 사용하여 파장 할당을 하는 문제는 그래프 도색(graph coloring)문제와 동일한 것으로 밝혀졌으며 따라서 NP-complete 계열에 속한다.[1]

파장 경로의 라우팅 결정에 있어서 최대 밀집도의 최소화는 파장 연속성 제약으로 인하여 직접적으로 파장 개수의 최소화를 의미하지는 않으나 결정된 밀집도는 요구되는 파장 개수의 하위 한계값(lower bound)이 되므로 밀집도의 최소화는 충분한 의미를 가지며 또한 각

노드에서 파장 변환기(wavelength converter)의 사용이 허용될 경우 파장 할당 문제는 사라지게된다.

본 논문에서는 파장 라우팅 WDM망의 RWA문제 중에서 파장 경로의 라우팅 결정 문제에 대해 고려한다. 이미 파장 경로 라우팅 결정을 위해 많은 휴리스틱 방식들이 제안되었으며 대표적인 방식으로 [3]의 방식과 [4]의 방식을 들 수 있다. 본 논문에서는 이와는 별도로 임의의 망구조(physical topology)에서 완전 연결(full connection) 형태로 통신 요구가 주어질 경우 최대 밀집도가 최소가 되는 파장 경로 설정을 branch-and-bound 탐색 방식을 이용하여 찾아내는 알고리즘을 제안한다. 완전 연결 형태의 통신 요구란 임의의 두 노드 사이에 반드시 하나의 파장 경로가 설정되어야 함을 의미한다.

NP-complete 문제에 대하여 branch-and-bound 탐색을 수행하는 것은 문제의 규모가 작아서 탐색 공간이 그다지 크지 않을 경우나 가능한 일이지만 초기의 탐색에 좋은 성능의 해를 찾아낼 가능성이 높다면 전체 탐색 시간을 제한함으로써 적절한 시간 안에 원하는 성능의 해를 얻을 수 있을 것이다 또한 초기의 탐색에서 고성능의 해를 찾아낸다면 이후의 탐색에서 이를 bound조건에 반영할 수 있으므로 주어진 시간 안에 보다 넓은 탐색 공간을 검사할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 제안된 알고리즘이 최초의 탐색에서 발견한 해의 성능을 구성된 탐색 공간내의 최적해와 cut-set을 이용하여 계산한 전체 최적해의 하위 한계값과 상호 비교하여 그 성능을 평가하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 문제의 정의가 명시되며 3장에서는 탐색 알고리즘에 대해 설명한다 4장에서는 시뮬레이션 실험에 대하여 기술하며 본 논문의 결론은 5장에서 맺는다.

## 2. 문제 정의

파장 경로 설정 문제는 각 노드들이 하나의 파장 경로를 통하여 연결되는 단일 홉(single hop) 문제와 하나 이상의 파장 경로를 경유하여 연결되는 다중 홉(multi-hop)방식으로 나눌 수 있다. 또한 망 설계 이전에 모든 통신 요구들이 미리 주어지고 망 운용 단계에서는 통신 요구들이 변화하지 않는 정적(static) 문제와 망 운용 도중에 통신 요구들이 도달하는 동적(dynamic) 문제로 나눌 수 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 문제는 단일 홉, 정적 파장 경로 설정 문제이다. 모든 노드들이 상호간에 통신이 이루어 질 수 있도록 완전 연결 형태의 통신 요구가 주어짐을 가정하였다. 또한 각각의 통신 요구는 하나의 파장 경로를 요구하는 것으로 가정한다. 본 논문에서 다루고자 하는 문제는 다음과 같다.

**Instance :** 임의의 망 구조(physical topology), 완전 연결 형태의 통신 요구

**Problem** 주어진 통신 요구를 모두 수용하면서 동시에 최소한의 최대 밀집도(congestion)를 가지는 파장 경로들의 라우팅 방식을 결정한다. 만약  $N$ 개의 노드로 구성된 임의의 망 구조가 입력된다면  $(N*(N-1))/2$ 개의 파장 경로 설정이 요구될 것이다. 앞서도 설명하였듯이 주어진 문제는 NP-complete문제이므로 망의 규모가 키질 경우 최적해를 구하기란 불가능하며 따라서 만족할 만한 성능의 국부 최적해를 얻을 수 있어야 한다. 다음 절에서는 이를 위한 탐색 공간의 축소, 탐색 초기에 고성능의 해를 얻기 위한 탐색 공간의 배치 방식, 그리고 branch-and-bound 탐색 알고리즘에 대해 설명한다.

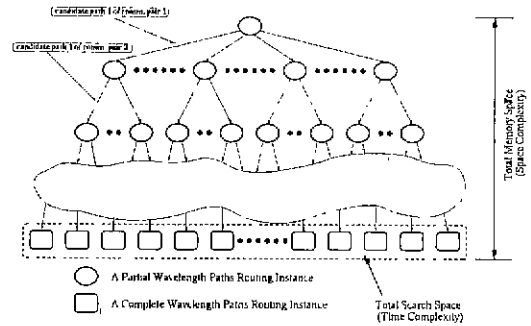


그림 1 탐색 트리 구조

## 3. 탐색 알고리즘

임의의 두 노드사이의 파장 경로는 서로 다른 많은 물리적 경로 상에 확립되어 질 수 있다. 최대 밀집도의 최소화를 위해서는 주어진 통신 요구들을 모든 후보 경로들에 대해 설정해보고 그 중 가장 작은 최대 밀집도를 가진 파장 경로 라우팅 설정을 찾아내야 한다. 그러나 이러한 방식은 과도한 탐색 공간의 크기로 인해 만족할 만한 성능의 해를 적절한 시간 안에 찾아내기가 힘들다. 따라서 본 논문에서는 두 노드사이의 파장 경로 설정을 위한 후보 경로들을 두 노드사이의 최단 거리 경로들로 제한을 두었다. 완전 연결 형태의 통신 요구의 경우 파장 경로들의 수용 요구가 망 내에서 균형을 이루어 분포하고 있으므로 최단 거리 경로를 선택하지 않고 우회로를 선택하는 것은 보통 불필요하게 망의 자원을 낭비한다고 볼 수 있다. 따라서 대부분의 경우 최단 거리 경로들로 구성된 탐색 공간 내에 최적해가 포함된다고 할 수 있으며 이는 시뮬레이션을 통해 검증된다.

탐색 공간의 구성은 그림 1과 같이 탐색 트리 형태를 가진다. 그림 1에서 레벨 0에 있는 루트 노드는 파장 경로가 설정되기 이전 단계를 말하며 레벨  $L$ 의 노드는  $L$ 번째 통신 요구 노드 쌍의 파장 경로가 수용된 결과를 의미한다. 레벨  $L$ 에서 레벨  $L+1$ 로의  $K$  번째 링크는  $L+1$ 번째 통신 요구 노드 쌍의 파장 경로를 설정하기 위한 후보 경로들 중  $K$ 번째 경로의 선택을 의미한다. 리프(leaf) 노드는 전체 노드 수가  $N$ 일 때  $N*(N-1)/2$  번째 레벨에 있으며 모든 통신 요구 노드 쌍의 파장 경로가 수용된 결과를 나타낸다. 리프노드들은 실질적인 탐색 공간을 구성한다. 탐색 트리의 구성에 있어서 존재하는 두 가지 결정 사항은 다음과 같다.

1. 어느 노드 쌍의 파장 경로를 먼저 수용할 것인가?
2. 수용하기로 결정한 노드 쌍에 대해 어느 경로를 먼저 선택하여 파장 경로를 확립할 것인가?

초기 탐색에서 고성능의 해를 찾아내기 위해서는 이 두 가지 항목의 적절한 고려가 반드시 필요하므로 각 경로 및 노드 쌍에 대해 점수를 계산하고 이를 기반으로 순서를 결정하는 방식을 사용하였다. 다음과 같은 자료 구조 및 절차를 통하여 순서가 결정된다.

- **Data structure** Score[1..N][1..N] matrix
- **Manipulation Functions**
  - Initialization(void)

1. For each candidate path  $P$  of all comm. pairs

1.1 If link  $ij$  is in  $P$

1.1.1  $Score[i][j] := Score[i][j] + 1;$

-Update\_Score\_Matrix(comm pair  $A$ , selected path  $P$ )

1. For each link  $ij$  such that belongs to  $A$ 's candidate paths but does not belongs to  $P$

1.1  $Score[i][j] := Score[i][j] - 1;$

-Restore\_Score\_Matrix(comm. pair  $A$ , deselected path  $P$ )

1. For each link  $ij$  such that belongs to  $A$ 's candidate paths but does not belongs to  $P$

1.1  $Score[i][j] := Score[i][j] + 1;$

• The score  $S_P$  of candidate path  $P$

-The first key  $K_1^P$  is  $\max(Score[i][j])$  if link  $ij$  is in  $P$

-The second key  $K_2^P$  is  $\frac{\sum Score[i][j]}{\text{length of } P}$  if link  $ij$  is in  $P$

-The score  $S_P$  is  $W_1^P K_1^P + W_2^P K_2^P$ ,  $W_1^P$  is weight for  $K_1^P$  and  $W_2^P$  is weight for  $K_2^P$ ,  $W_1^P \gg W_2^P$

• The score  $S_C$  of comm. pair  $C$

-The first key  $K_1^C$  is the number of candidate paths

-The second key  $K_2^C$  is  $S_{P2}^C - S_{P1}^C$  (if  $K_1^C > 1$ , else ignore it)

$S_{P1}^C$  is the score of  $P1$  that belongs to the candidate paths of  $C$  and with the lowest score.

$S_{P2}^C$  is the score of  $P2$  that belongs to the candidate paths of  $C$  and with the second lowest score.

-The score  $S_C$  is  $W_1^C K_1^C - W_2^C K_2^C$ , where  $W_1^C$  is weight for  $K_1^C$  and  $W_2^C$  is weight for  $K_2^C$ , and

$$K_2^C = \begin{cases} K_2^C & \text{if } K_2^C \neq 0 \\ W_3 & \text{else} \end{cases}, \quad W_3 \gg W_1^C \gg W_2^C.$$

점수 결정에 있어서 적용되는 가중치(weight) 값들은 순서 결정시 주도적 역할을 하게 되는 키를 지정해 주기 위함이며 어떠한 값을 가지는지는 중요하지 않다 결정된 점수를 이용하여 branch-and-bound 탐색을 수행하며 그 조건 및 절차는 다음과 같다.

• **Branch Condition** : 현재 partial routing instance의 밀집도가 이전 발견된 complete routing instance의 밀집도보다 작을 경우

• **Branch Operation**

1. For each non-accumulated comm. pair  $A$

1.1 Calculate  $S_A$ ;

2.  $M :=$  a comm. pair with the smallest score;

3. For each candidate path  $P$  of  $M$  in increasing order of  $S_P$

3.1 Update\_Score\_Matrix( $M, P$ );

3.2 Evaluate current congestion and do branch if necessary;

• **Bound Condition** : branch condition을 만족하지 못할 경우

• **Bound Operation** -  $M$  is the recently accumulated comm. pair and  $P$  is the recently selected candidate path of  $M$

1. Restore\_Score\_Matrix( $M, P$ );

리프 노드에 도달한 경우 Score matrix를 검사하여 최대 밀집도를 알 수 있다.

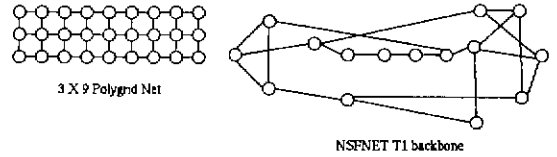


그림 2 실험 대상 망 구조

4. 시뮬레이션

실험은 그림 2에서 제시된 망 구조와 다수의 랜덤 네트워크를 대상으로 하였다. 탐색시 최초로 도달한 리프 노드의 성능을 하위 한계값 및 구성된 탐색 공간내의 최적해와 비교하였다. 그림 2의 polygrid망의 경우 최대 밀집도의 하위 한계값은 60으로 계산이 되었으며 최초에 도달한 리프 노드의 최대 밀집도 또한 60이었다. 그림 2의 T1망의 경우도 하위 한계값, 최초 도달 리프 노드의 밀집도 모두 13으로 일치했다. 10개의 노드, 15개의 링크, 2부터 4사이의 노드 degree를 가지도록 다수의 랜덤 네트워크를 구성한 후 적합한 결과 평균 85% 정도로 구성된 탐색 공간 내의 최적해를 최초의 탐색에서 찾아낼 수 있었다. 그러나 최단 거리 경로만으로 탐색공간을 구성하였으므로 전체 최적해가 반드시 구성된 탐색 공간내의 최적해와 일치한다는 보장은 할 수 없다. NP-complete문제에서 최적해의 값을 알아내는 것은 최적해를 구하는 것만큼이나 어려운 일이므로 정확한 값을 알 수 없으나 cut-set을 이용하여 계산한 하위 한계값과 비교할 경우 70% 정도의 확률로 하위 한계값과 탐색 공간내의 최적해가 동일한 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 WDM망의 RWA문제 중에서 파장 경로의 라우팅 결정 문제를 branch-and-bound 탐색에 기반 하여 다루어보았다. 실험 결과 탐색 초기에 고성능의 해를 얻을 수 있는 확률이 상당히 높으므로 필요에 따라 탐색 시간을 조정하여 적절한 휴리스틱 방식으로 활용되어 질 수 있을 것이다.

6. 참고 문헌

[1] Biswanath Mukherjee, "Optical Communication Networks", Mc Graw Hill  
 [2] Ramaswami, Sivaraman "Optical Networks, A Practical Perspective", Morgan Kaufmann  
 [3] Ken-ichi Sato "Optical Path Accommodation Designs Applicable to Large Scale Networks", IEICE Tr. Comm. 1995  
 [4] Mukherjee, "A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks", IEEE JSAC, JUNE 1996