

## 경로설정과 파장 배정 문제의 독립집합 상자 채우기 알고리즘

이 상 운\*

# Independent Set Bin Packing Algorithm for Routing and Wavelength Assignment (RWA) Problem

Sang-Un Lee \*

### 요 약

본 논문은 광통신망에서  $(s,t)$ 에 대한 다중 패킷 통신 요구에 대해 최적의 광 경로를 설정하고, 최소 파장 수를 배정하는 경로설정과 파장 배정 문제 (RWAP)를 다룬다. RWAP는 지금까지 다항시간으로 최적 해를 구하는 알고리즘이 알려져 있지 않은 NP-완전으로 근사 해를 다항시간으로 구하고 있다. 본 논문은 주어진 망의 모든  $(s,t)$ 에 대해 최단 광 경로로 동일한 홉 수를 갖는 주경로와 대체경로를 사전에 결정하고,  $(s,t)$ 에 대한 실제 특정 다중 패킷 통신이 요구될 때 이들 이중 경로를 이용하여 최대 이용되는 간선의 이용횟수를  $b$ 개로 줄이고,  $b$ 개의 파장 수 상자에 중복 간선 없이 담는 방법으로  $O(kn)$  계산 복잡도로 최적 해를 구할 수 있었다. 2개의 실험 데이터 망에 적용한 결과, 제안된 알고리즘은 기존에 알려진 최적 해를 얻을 수 있음을 보였다.

▶ Keywords : 광 경로설정, 파장 배정, 이중경로, 독립집합, 상자 채우기

### Abstract

This paper deals with the routing and wavelength assignment problem (RWAP) that decides the best lightpaths for multiple packet demands for  $(s,t)$  in optical communication and assigns the minimum number of wavelengths to given lightpaths. There has been unknown of polynomial-time algorithm to obtain the optimal solution for RWAP. Hence, the RWAP is classified as NP-complete problem and one can obtain the approximate solution in polynomial-time. This paper decides the shortest main and alternate lightpath with same hop count for all  $(s,t)$  for given network in advance. When the actual demands of communication for particular multiple packet for  $(s,t)$ , we decrease the maximum utilized edge into  $b$  utilized number using these dual-paths. Then, we put these  $(s,t)$  into  $b$ -wavelength bins without duplicated edge. This algorithm can be get the optimal solution within  $O(kn)$  computational complexity. For two experimental data, the

•제1저자 : 이상운

•투고일 : 2014. 10. 23. 심사일 : 2014. 11. 11. 게재확정일 : 2014. 12. 10.

\* 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 (Dept. of Multimedia Eng., Gangneung-Wonju National University)

proposed algorithm shows that can be obtain the known optimal solution.

▶ Keywords : Lightpath routing, Wavelength assignment, Dual-path, Independent set, Bin packing

## I. 서 론

$m$ 개의 패킷 스위치들로 구성된 광통신망에서  $k$ 개의  $s$ 에서  $t$ 로의 패킷 전송이 동시에 요구될 경우, 경로설정(routing)과 파장 배정(wavelength assignment)을 해야 한다. 이를 RWAP (routing and wavelength assignment problem)라 한다[1]. 여기서 경로 설정은 원천  $s$ 로부터 망 패킷(network packet)이 중간 노드(intermediate nodes)들을 거쳐 목적지  $t$ 까지 전달되는 망의 최적의 경로(best paths)들을 선택하는 과정이다. 이와 같이 설정된 경로를 따라 광통신은 레이저의 다른 파장을 통해 신호가 전송된다. 우리의 목적은 최소의 파장을 사용해 동시에 통신을 하는 것이므로 설정된 다수의 통신 경로들에 대해 별개(distinct)의 최소의 파장으로 분할해야 한다.

RWAP는 NP-완전(NP-complete)으로 분류되어 최적 해를 구하는 다항시간 알고리즘이 알려져 있지 않고 있다[2].

RWAP는 대부분 정수 선형계획법(integer linear programming, ILP)을 적용하여 문제의 해를 얻고자 하였다[1]. ILP 또한 NP-완전으로 매우 작은 규모의 문제에 대해서만 해를 얻을 수 있는 관계로 대규모 문제에 대해서는 휴리스틱 알고리즘을 사용해야만 한다[3].

메타휴리스틱 방법으로는 Markovic과 Acimovic-Raspopovic[4]의 BCO (bee colony optimization) Dzungang et al[5]의 Tabu 탐색법이 연구되었다. 휴리스틱 방법으로, Chlamtac et al.[2]은  $(s, t)$ 의 최단경로를 고정시킨 상태에서 가장 긴 경로에 파장을 배정하는 LFFP (longest first fixed path) 법을, Baroni와 Bayvel[6]은 가장 심한 부하를 경감시키기 위해 대체 최단경로를 사용하고 최장 경로에 우선하여 파장을 배정하는 MNH (minimum number of hops)법을, Siregar et al.[7]은 최단경로로 설정되지 않은 대체경로를 사용하고 최장 경로에 우선하여 파장을 배정하는 LFAP (longest first alternate path)와 LFFP로 초기 경로를 결정하고, 가장 심한 부하를 가진 간선의 부하를 경감시키는 대체경로를 찾아 파장 수를 최소화 시키는 HPLD (heaviest path load deviation)법을 제안하였다.

이와 같이 NP-완전인 RWAP와 관련하여 지금까지는 대부분 LP와 같은 수학적 접근법을 적용하고 있는 실정이며,

다항시간으로 해를 얻기 위해 일부 휴리스틱 알고리즘을 연구하고 있다.

본 논문에서는  $(s, t)$ 의 수를  $k$ , 망의 간선 수를  $n$ 이라 할 때, RWAP의 최적 해를  $O(kn)$ 의 다항시간으로 얻을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

2장에서는 RWAP 개념과 평가척도에 대해 연구 사례를 중심으로 고찰해 본다. 3장에서는  $O(kn)$ 수행 복잡도로 RWAP의 최적 해를 구할 수 있는 독립집합 상자 채우기 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 실험 데이터에 적용하여 알고리즘 적합성을 평가해 본다.

## II. 경로설정과 파장 배정 문제

RWAP는  $(s, t)$ 간의  $k$ 개의 최적의 광 경로 노선(route)을 찾는 다음, 모든 노선들을 최소의 파장으로 배정하는 두 단계를 거치는 문제이다. 이 문제가 충족해야 하는 제약조건은 다음과 같다.

- (1) 2개의 광 경로는 동일한 광섬유 회선(fiber link)인 간선에서 동일 파장을 공유할 수 없다.
- (2) 파장변환장치가 없는 상태에서 하나의 광 경로는 자신의 경로 상에 있는 각 회선(간선)에서 동일 파장을 차지해야만 한다. 이 제약사항을 파장 연속성 제약조건(wavelength-continuity constraint)이라 한다.

그림 1은 8개의 노드를 연결한 10개 광 스위치를 가진 WDM (wavelength division multiplex) 망으로, Jue[3]와 Banerjee와 Mukherjee[8]에서 인용되었다. 여기서는 (E,A), (F,B), (C,D)와 (D,E)의 데이터 전송이 요구되는 상황이다.

(E,A)의 광 전용회선은 9-8-5-1을 거치며, (F,B)는 4-8-7-6, (C,D)는 7-10, (D,E)는 10-9를 거친다. 이 경우 최소의 파장을 배정하기 위해서는 동일 간선에 2개의 광 전용회선이 겹치면 안되며, 이들은 (D,10)과 (9,E)이다. 따라서, 최소 파장 수는 2로  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 를 배정할 수 있다.

RWAP는 NP-완전인 다중상품 흐름 문제(multi-commodity flow problem, MCFP)[9]로 볼 수 있으며, 각 링크의 흐름을 최소화시키는 정수 선형계획법(ILP)으로 표현될 수 있다[1,8].  $\lambda_{sdw}$ 를 원천  $s$ 에서 목적지  $t$ 로 파장  $w$ 를 이용하는 트래픽

(파장)이라 하면 하나의 원천에서 하나의 목적지로 기껏해야 하나의 파장만 존재해야 한다.

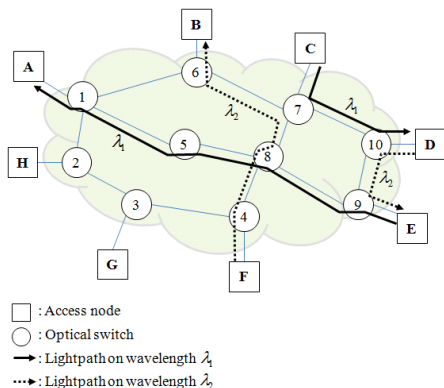


그림 1. 광 전용회선을 가진 파장-경로설정 WDM 망  
Fig. 1. Wavelength-routed WDM network with lightpaths

따라서,  $s$ 에서  $t$ 로의 파장이 존재하면  $\lambda_{sdw} = 1$ , 그렇지 않으면  $\lambda_{sdw} = 0$ 이다. 여기서 양방향 파장은 없기 때문에  $\lambda_{sdw} = 1$ 이면 또한  $\lambda_{dsw} = 1$ 로 방향성을 고려하지 않는다.  $F_{ij}^{sdw}$ 를 링크  $ij$ 를 따라  $(s,t)$ 로 흐르는 트래픽 (파장  $w$ )라 하면 선형계획법 공식으로 얻고자 하는 첫 번째 평가기준은 식 (1)과 같다[1,8].

$$z = \text{minimize } F_{\max} \quad (1)$$

$$\text{such that: } F_{\max} \geq \sum_{s,d,w} F_{\max}^{sdw}, \forall ij$$

$$\sum_i F_{ij}^{sdw} - \sum_k F_{jk}^{sdw} = \begin{cases} -\lambda_{sdw}, & \text{if } s = j \\ \lambda_{sdw}, & \text{if } d = j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sum_w \lambda_{sdw} = \wedge_{sd}$$

$$F_{ij}^{sdw} = [0 \mid 1]$$

$$\sum_{s,d} F_{ij}^{sdw} \leq 1$$

두 번째 평가기준으로 홉 수 (hop count)가 있다. 홉 수는  $s$  호스트에서  $t$  호스트 사이에 존재하는 데이터 패킷이 전달되는 경로상의 중간 기기인 스위치 (라우터 또는 게이트웨이) 수이다. 그림 1에서 (E,A) 호스트를 예를 들면 E-9-8-5-1-A로 홉은 9,8,5,1로 홉 수는 4이다. 홉 수는 속도, 부하, 신뢰성 또는 지연 등을 고려하지 않아 망 경로의 최적화를 결정하는데 유용하지는 않지만 광통신망에서는 빛의 속도로 전송되는 관계로 모든 간선들의 거리를 1로 취급할 수 있어 거리가 중요한 평가요소가 되지 않는다. 따라서, 홉 수가 최적 경로 평가요소로 사용되기도 한다[10].

RWAP는 NP-완전으로 분류되어 있어 다항시간으로 최적

해를 찾을 수 있는 알고리즘이 알려져 있지 않다[2,3,8]. ILP 또한 NP-완전으로 매우 작은 규모의 문제에 대해서만 해를 얻을 수 있는 관계로 대규모 문제에 대해서는 휴리스틱 알고리즘을 사용해야만 한다[3].

Jang et al.[1]은 그림 2의 RWAP에 대해 그래프 색칠 문제 (graph coloring)로 풀고자 하였다. 주어진 광 경로를 정점으로, 광 경로들이 중첩되는 경우를 간선으로 표현하여 최소 채색 수 (minimum chromatic number,  $\chi(G)$ )를 구하고자 하였다. 채색수 방법으로는 Li와 Simha[11]의 연구도 있다. 채색 수 문제 또한 NP-완전으로 분류되어 있다 [12]. Jang et al.[1]이 그림 2의 문제에 대해 얻은 결과는 그림 3과 같이 R,G,B의 3색인 파장 수는 3이다.

이와 같이 RWAP와 관련하여 NP-완전인 수학적 접근법인 선형계획법이나 채색 수 알고리즘이 적용되고 있지만 다항 시간으로 최적 해를 구하는 알고리즘이 제안되지 않고 있는 실정이다.

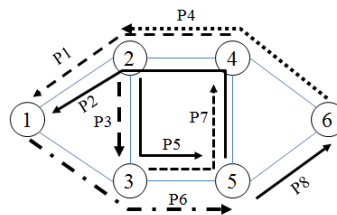
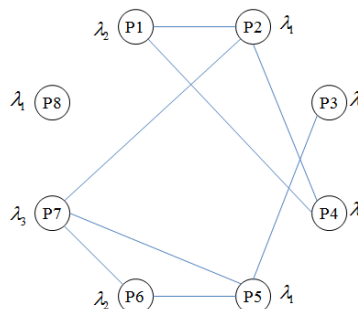


그림 2. 8개 광 경로를 가진  $N_1$  망  
Fig. 2. A  $N_1$  network with eight routed lightpaths



$$\lambda_1 = R = \{P_2, P_3, P_8\}, \lambda_2 = G = \{P_1, P_3, P_6\}, \lambda_3 = B = \{P_4, P_7\}$$

파장	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{2,3}	{2,4}	{3,5}	{4,5}	{4,6}	{5,6}	Path	간선 수	홉 수
$\lambda_1$	(5,1)	1					1			5-4-2-1	3	4
	(2,5)			1		1				2-3-5	2	3
	(5,6)							1		5-6	1	2
$\lambda_2$	(4,1)	1			1					4-2-1	2	3
	(2,3)			1						2-3	1	2
	(1,5)		1			1				1-3-5	2	3
$\lambda_3$	(6,2)				1			1		6-4-2	2	3
	(3,4)						1			3-5-4	2	3
계		2	1	2	3	3	2	1	1		15	23

그림 3. 그래프 색칠 문제의 3개 파장  
Fig. 3. 3-wavelengths for graph coloring

3장에서는, 본 문제와 관련하여 다항시간으로 최적 해를 구할 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

### III. 이중경로 설정과 파장 배정 알고리즘

RWAP는 첫 번째로 다중 패킷 통신 요청에 대해 각  $(s, t)$ 의 최적의 경로를 결정하고, 다음으로 최소의 파장을 배정해야 한다.

다중 패킷 통신 요청에 대해 각  $(s, t)$ 의 최적의 경로는 주어진 망이 고정 (fixed)된 상태로 망 설치 단계에서 사전에 결정할 수 있다. 경로 설정에 대해 대부분의 방법들이 DA (Dijkstra algorithm)이나 BFMA (Bellman-Ford-Moore algorithm)을 적용하고 있다. 노드 수를  $m$ , 간선 수를  $n$ 이라 할 때, DA의 수행 복잡도는  $O(m^2)$ 이나  $O(m+n \log n)$ 이며, BFMA는  $O(VE)$ 이다.

본 장에서는 근방탐색 (neighborhood search) 개념을 적용하여  $O(m+n)$  수행 복잡도의 BFS (breadth-first search)나 DFS (depth-first search)의 트리 탐색으로 최적의 경로를 찾는 방법을 제안한다. 이 방법은  $s$ 의 인접 노드들  $v_1$ 을  $N_1(s)$ ,  $N_1(v_1)$ 의 인접 노드들  $v_2$ 를  $s$ 의 2차 근방  $N_2(s)$ 로 하여  $t$ 까지의 중간 노드들을 찾아 최소의 동일한 홉 수 (hop count)를 가진 주경로 (main path)와 대체경로 (alternate path)를 설정한다. 여기서 홉 수는  $(s, t)$ 의 경로에서 거치는 광 스위치 개수이다.

제안된 알고리즘은 사전에 파악된  $m \times n$ 개의  $(s, t)$  주경로와 대체경로 테이블 데이터를 활용하여, 실제로 통신이 요구되는  $(s, t)$ 들을 대상으로, 행을  $(s, t)$ , 열을  $s$ 에서  $t$ 까지 거치는 스위치들 간의 간선으로 표현한 행렬을 이용한다. 행렬 값  $(i, j) = [1|0]$ 으로 임의의 만약,  $(s, t)$ 인  $i$ 행이  $j$ 번째 간선을 거치는 광 경로를 갖고 있으면  $(i, j) = 1$ 로 표시한다. 여기서  $(j, i)$ 도  $(i, j)$ 로 계산된다. 각 열의  $\sum_{i=1}^k (., j)$ 를 계산하여  $\max \sum_{i=1}^k (., j)$ 를 갖는  $j$ 열의  $i$ 행인  $(s, t)$ 들에 대해 대체경로로 변경시  $\max \sum_{i=1}^k (., j)$ 를 감소시킬 수 있으면 해당  $(s, t)$ 의 광 경로는 대체경로로 변경한다.

최소 파장을 배정하는 방법으로 본 장에서는 채색수 알고리즘에서 적용한 독립집합을 하나의 파장 (색)으로 배정하는 방법을 응용하여  $\max \sum_{i=1}^k (., j)$ 를 가진  $b$ 개의  $(s, t)$ 들을 각각  $b$ 개 상자에 채우는 방법을 적용한 독립집합 상자 채우기 알고

리즘 (independent set bin packing algorithm, ISBPA)을 제안한다. 일단  $b$ 개 상자에 하나씩  $(s, t)$ 를 채운 후 나머지 미배정된  $(s, t)$ 들은 각 상자에 채워진  $(s, t)$ 와 동일한 열 (간선)을 갖지 않는  $(s, t)$ 들을 선정하여 채우는 방법이다. 이 과정을 남아 있는  $(s, t)$ 들이 없을 때까지 반복 수행한다.

제안된 ISBPA는 다음과 같이 수행된다.

#### [사전 준비단계]

for  $i=1$  to  $m$  /\*  $m$ 개 노드 각각의 통신 최적경로 결정 \*/  
 $(s, t)$ 의 최소 홉 수를 가진 주경로와 대체경로를 찾음.  
 end

#### [최소 파장 수 결정 단계]

Step 1. 최소 중첩 간선 결정

(1)  $k$ 개의  $(s, t)$ 를  $i$ 행, 망의 광 스위치들 간의  $n$ 개 간선을  $j$ 열로 하는 행렬 작성

(2)  $(s, t)$ 의 주경로에 대해  $(i, j) = 1$ 로 설정

for  $j=1$  to  $n$  /\*  $n$ 개 간선 이용 광 경로수 결정 \*/

각 열의 개수  $\sum_{i=1}^k (., j)$  계산

end

최대 이용 간선  $\max \sum_{i=1}^k (., j) = b$ 의  $(i, j) = 1$ 인 행  $(s, t)$

들을 대상으로 대체경로로 변경시  $\max \sum_{i=1}^k (., j) = b$ 를

감소시킬 수 있으면 해당  $(s, t)$ 의 광 경로를 대체경로로 변경

Step 2. 최소 파장 수 결정

$\max \sum_{i=1}^k (., j) = b$ 개 파장 상자  $w_1, w_2, \dots, w_b$  준비

for  $i=1$  to  $b$

$\max \sum_{i=1}^k (., j) = b$ 를 갖는  $b$ 개의  $(s, t)$ 를 각 파장

상자에 1개씩 넣음

end

for  $i=1$  to  $k-b$

남은  $(s, t)$ 들을 해당  $(s, t)$ 의 모든 열과 독립인 파장 상자에 넣음

end

제안된 ISBPA를 그림 2의  $N_1$  망에 적용한 결과는 표 1에 제시되어 있다.

표 1.  $N_1$  망에 대한 ISBPA의 파장 수

Table 1. Number of wavelengths of ISBPA for  $N_1$  network

(s,t)	{1,2}	{1,3}	{2,3}	{2,4}	{3,5}	{4,5}	{4,6}	{5,6}	Main path	Alternate path
(4,1)	1			1					4-2-1	
(5,1)		1			1				5-3-1	
(2,3)			1						2-3	
(6,2)				1			1		6-4-2	
(2,5)		1			1				2-3-5	2-4-5
(1,5)					1				1-3-5	
(3,4)					1	1			3-5-4	3-2-4
(5,6)							1		5-6	
계	1	2	2	2	4	1	1	1		

(s,t)	{1,2}	{1,3}	{2,3}	{2,4}	{3,5}	{4,5}	{4,6}	{5,6}	Main path	Alternate path
(4,1)	1			1					4-2-1	
(5,1)		1			1				5-3-1	
(2,3)			1						2-3	
(6,2)				1			1		6-4-2	
(2,5)				1		1			2-3-5	2-4-5
(1,5)		1			1				1-3-5	
(3,4)					1	1			3-5-4	3-2-4
(5,6)							1		5-6	
계	1	2	1	3	3	2	1	1		

파장	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{2,3}	{2,4}	{3,5}	{4,5}	{4,6}	{5,6}	Path
w1	(4,1)	1			1					4-2-1
	(5,1)		1			1				5-3-1
w2	(6,2)				1			1		6-4-2
	(3,4)					1	1			3-5-4
w3	(2,5)					1		1		2-4-5
	(1,5)		1			1				1-3-5
미배정	(2,3)			1						2-3
	(5,6)							1		5-6

파장	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{2,3}	{2,4}	{3,5}	{4,5}	{4,6}	{5,6}	Path	간선 수	홑 수
w1	(4,1)	1			1					4-2-1	2	3
	(5,1)		1			1				5-3-1	2	3
	(2,3)			1						2-3	1	2
w2	(6,2)				1			1		6-4-2	2	3
	(3,4)					1	1			3-5-4	2	3
	(5,6)							1		5-6	1	2
w3	(2,5)				1		1			2-4-5	2	3
	(1,5)		1			1				1-3-5	2	3
계		1	2	1	3	3	2	1	1		14	22

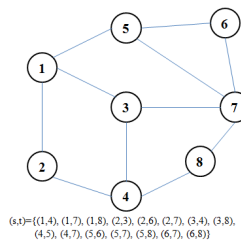
Step 1에서 8개의 (s,t)에 대한 주경로와 대체경로를 구하여 주경로에 대해 (i,j)=1을 표시한 결과 {3,5} 간선 열을 4회 사용하는 결과를 얻었다. 이 간선을 이용하는 (5,1), (2,5), (1,5)와 (3,4) 중에서 대체 경로가 존재하는 (2,5)와 (3,4) 중에서 (2,5)의 2-3-5 경로를 2-4-5 경로로 변경한 결과 {2,4}와 {3,5} 간선의 이용횟수가 3으로 줄일 수 있었다. 따라서, 8개의 (s,t)를 독립집합들로 구성된 3개의 파장 상자에 채울 수 있다면 최소로 필요로 하는 파장 수는 3으로 결정할 수 있음을 알 수 있다. Step 2에서는 이용횟수가 최대인 {2,4}와 {3,5} 간선의 (s,t)들을 3개 상자  $w_1, w_2, w_3$ 에 각각 1개씩 넣은 결과  $w_1 = \{(4,1), (5,1)\}$ ,  $w_2 = \{(6,2), (3,4)\}$ ,  $w_3 = \{(2,5), (1,5)\}$ 이며, 미배정된 (s,t)는 (2,3)과 (5,6)을 얻는다. 다음으로, (2,3)을  $w_1$ 에, (5,6)을  $w_2$ 에 넣어 알고리즘이 종료되었으며, 각 상자에는 열의 개수 (이용 횟수)가 모두 1로 충족 사용되지 않음을 알 수 있다. 따라서,  $w_1 = \{(4,1), (5,1), (2,3)\}$ ,  $w_2 = \{(6,2), (3,4), (5,6)\}$ ,

$w_3 = \{(2,5), (1,5)\}$ 로 파장이 배정되어 파장 수는 3으로 Jang et al.[1]의 채색 수 알고리즘과 동일한 결과를 얻었지만 홑 수는 23개를 22개로 감소시켰다.

제한된 ISBPA는 (s,t) 수를 k, 망의 간선 수를 n이라 할 경우  $O(kn)$ 수행 복잡도로 최적 해를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있다. 즉, NP-완전으로 분류되어 다항시간 알고리즘이 알려져 있지 않은 RWAP에 대해 다항시간 알고리즘이 존재함을 보였다.

### IV. 실험 및 결과 분석

본 장에서는 그림 4의  $N_2$  망에서 15개의 통신이 요구된 경우에 대해 제한된 ISBPA를 적용하여 본다.  $N_2$  망은 Siregar et al.[7]에서 인용되었다.



(s,t)={(1,4), (1,7), (1,8), (2,3), (2,6), (2,7), (3,4), (3,8), (4,5), (4,7), (5,6), (5,7), (5,8), (6,7), (6,8)}

그림 4.  $N_2$  망  
Fig. 4.  $N_2$  network

Siregar et al.[7]은 알려진 LFFP와 MNH를 적용하고, 새로운 방법으로 LFAP와 HPLD를 제안하였다. 실험 결과 얻은 경로선택과 파장 수/홑 수는 표 2에 제시되어 있다.

표 2.  $N_2$  망에 대한 LFFP, MNH, LFAP와 HPLD 결과  
Table 2. Result of LFFP, MNH, LFAP and HPLD for  $N_2$  network

(s,t)	lightpaths			
	LFFP	MNH	LFAP	HPLD
(1,4)	1-2-4	1-2-4	1-5-7-8-4	1-5-7-8-4
(1,7)	1-3-7	1-3-7	1-3-7	1-3-7
(1,8)	1-2-4-8	1-3-7-8	1-2-4-8	1-2-4-8
(2,3)	2-1-3	2-4-3	2-4-3	2-4-8-7-3
(2,6)	2-1-5-6	2-1-5-6	2-1-5-6	2-1-5-6
(2,7)	2-1-3-7	2-1-3-7	2-1-3-7	2-1-3-7
(3,4)	3-4	3-4	3-4	3-4
(3,8)	3-4-8	3-4-8	3-4-8	3-4-8
(4,5)	4-2-1-5	4-2-1-5	4-2-1-5	4-2-1-5
(4,7)	4-3-7	4-3-7	4-3-7	4-3-7
(5,6)	5-6	5-6	5-6	5-6
(5,7)	5-7	5-7	5-7	5-7
(5,8)	5-7-8	5-7-8	5-7-8	5-7-8
(6,7)	6-7	6-7	6-7	6-7
(6,8)	6-7-8	6-7-8	6-7-8	6-7-8
<b>w1</b>	{(4,5), (4,7), (5,8), (5,6), (6,7)}	{(4,5), (1,7), (3,8)}	{(4,5), (4,7), (5,8), (5,6), (6,7)}	{(2,3), (2,6), (3,4), (5,7), (6,7)}
<b>w2</b>	{(1,8), (1,7), (6,8), (3,4), (5,7)}	{(1,4), (4,7), (6,8), (5,7)}	{(1,8), (1,7), (6,8), (3,4), (5,7)}	{(1,4), (2,7), (5,6)}
<b>w3</b>	{(2,6), (3,8)}	{(5,8), (2,7), (3,4), (5,6)}	{(2,6), (3,8)}	{(4,5), (1,7), (3,8), (5,8)}
<b>w4</b>	{(2,7)}	{(2,3), (1,8), (2,6), (6,7)}	{(2,7), (1,4), (2,3)}	{(1,8), (6,8), (4,7)}
<b>w5</b>	{(1,4)}	-	-	-
<b>w6</b>	{(2,3)}	-	-	-
<b>홑 수</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>47</b>	<b>49</b>

LFPP는 6/45, MNH은 4/45, LFAP는 4/47, HPLD는 4/49로, 제안된 LFAP와 HPLD는 기존에 알려진 MNH에 비해 동일한 파장 수는 얻었지만 홑 수가 +2와 +4로 보다 나쁜 결과를 얻었다.

그림 4의  $N_2$  망에 ISBPA를 적용한 결과는 표 3에 제시되어 있다.

표 3.  $N_2$  망에 대한 ISBPA의 파장 수

Table 3. Number of wavelengths of ISBPA for  $N_2$  network

(s,t)	{1,2}	{1,3}	{1,5}	{2,4}	{3,4}	{3,7}	{4,8}	{5,6}	{5,7}	{6,7}	{7,8}	Main Path	Alternate path
(1,4)	1											1-2-4	1-3-4
(1,7)		1										1-3-7	
(1,8)	1											1-2-4-8	1-3-7-8
(2,3)	1	1										2-1-3	2-4-3
(2,6)	1											2-1-5-6	
(2,7)	1	1										2-1-3-7	2-4-8-7
(3,4)												3-4	
(3,8)					1							3-4-8	3-7-8
(4,5)	1		1	1								4-2-1-5	4-3-1-5
(4,7)					1	1						4-3-7	4-8-7
(5,6)										1		5-6	
(5,7)											1	5-7	
(5,8)											1	5-7-8	
(6,7)												6-7	
(6,8)												6-7-8	
계	6	3	1	3	3	3	2	2	2	2	2		

(s,t)	{1,2}	{1,3}	{1,5}	{2,4}	{3,4}	{3,7}	{4,8}	{5,6}	{5,7}	{6,7}	{7,8}	Main path	Alternate path
(1,4)	1											1-2-4	1-3-4
(1,7)		1										1-3-7	1-3-4
(1,8)	1											1-2-4-8	1-3-7-8
(2,3)				1	1							2-1-3	2-4-3
(2,6)	1		1									2-1-5-6	
(2,7)	1	1										2-1-3-7	2-4-8-7
(3,4)					1							3-4	
(3,8)					1							3-4-8	
(4,5)	1		1	1								4-2-1-5	4-3-1-5
(4,7)					1	1						4-3-7	
(5,6)										1		5-6	
(5,7)											1	5-7	
(5,8)											1	5-7-8	
(6,7)												6-7	
(6,8)												6-7-8	
계	4	3	2	3	4	4	1	2	2	2	3		

파장	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{1,5}	{2,4}	{3,4}	{3,7}	{4,8}	{5,6}	{5,7}	{6,7}	{7,8}	Path
w1	(1,4)	1											1-2-4
w2	(2,6)	1			1								2-1-5-6
w3	(2,7)	1	1										2-1-3-7
w4	(4,5)	1		1	1								4-2-1-5

미배정	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{1,5}	{2,4}	{3,4}	{3,7}	{4,8}	{5,6}	{5,7}	{6,7}	{7,8}	Path
w1	(1,7)		1										1-3-7
w2	(1,8)	1										1	1-3-7-8
w3	(2,3)				1	1							2-4-3
w4	(3,4)					1							3-4
w5	(3,8)					1						1	3-4-8
w6	(4,7)					1	1						4-3-7
w7	(5,6)									1			5-6
w8	(5,7)										1		5-7
w9	(5,8)										1	1	5-7-8
w10	(6,7)											1	6-7
w11	(6,8)											1	6-7-8

파장	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{1,5}	{2,4}	{3,4}	{3,7}	{4,8}	{5,6}	{5,7}	{6,7}	{7,8}	Path
w1	(1,4)	1				1							1-2-4
w2	(1,7)		1					1					1-3-7
w3	(2,6)	1			1					1			2-1-5-6
w4	(1,8)	1						1				1	1-3-7-8
w5	(2,7)	1	1					1					2-1-3-7
w6	(2,3)					1	1						2-4-3
w7	(4,5)	1			1	1							4-2-1-5
w8	(4,7)					1	1						4-3-7

미배정	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{1,5}	{2,4}	{3,4}	{3,7}	{4,8}	{5,6}	{5,7}	{6,7}	{7,8}	Path
w9	(3,4)					1							3-4
w10	(3,8)					1		1					3-4-8
w11	(5,6)								1				5-6
w12	(5,7)									1			5-7
w13	(5,8)										1	1	5-7-8
w14	(6,7)											1	6-7
w15	(6,8)											1	6-7-8

파장	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{1,5}	{2,4}	{3,4}	{3,7}	{4,8}	{5,6}	{5,7}	{6,7}	{7,8}	Path
w1	(1,4)	1				1							1-2-4
w2	(1,7)		1					1					1-3-7
w3	(3,8)							1		1			3-4-8
w4	(2,6)	1			1					1			2-1-5-6
w5	(1,8)	1						1				1	1-3-7-8
w6	(3,4)						1						3-4
w7	(2,7)	1	1					1					2-1-3-7
w8	(2,3)					1	1						2-4-3
w9	(5,6)									1			5-6
w10	(4,5)	1			1	1							4-2-1-5
w11	(4,7)						1	1					4-3-7
w12	(5,7)										1		5-7

미배정	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{1,5}	{2,4}	{3,4}	{3,7}	{4,8}	{5,6}	{5,7}	{6,7}	{7,8}	Path
w13	(5,8)										1	1	5-7-8
w14	(6,7)											1	6-7
w15	(6,8)											1	6-7-8

파장	(s,t)	{1,2}	{1,3}	{1,5}	{2,4}	{3,4}	{3,7}	{4,8}	{5,6}	{5,7}	{6,7}	{7,8}	Path	홑 수
w1	(1,4)	1				1							1-2-4	3
w2	(1,7)		1					1					1-3-7	3
w3	(3,8)							1		1			3-4-8	3
w4	(5,8)									1	1		5-7-8	3
w5	(2,6)	1			1				1				2-1-5-6	4
w6	(1,8)	1						1			1		1-3-7-8	4
w7	(3,4)						1						3-4	2
w8	(6,7)										1		6-7	2
w9	(2,7)	1	1					1					2-1-3-7	4
w10	(2,3)					1	1						2-4-3	3
w11	(5,6)								1				5-6	2
w12	(6,8)										1	1	6-7-8	3
w13	(4,5)	1			1	1							4-2-1-5	4
w14	(4,7)						1	1					4-3-7	3
w15	(5,7)									1			5-7	2
계		4	3	2	3	4	4	1	2	2	2	3		45

첫 번째로 15개의 (s,t)에 대한 주경로를 표시한 결과 {1,2} 간선이 6회 사용되어 (1,8)과 (2,3)을 대체경로로 변경하여 {1,2}, {3,4}와 {3,7}이 4회 사용되도록 하였다. 따라서 이 결과에 대해 4개의 파장 수 상자에 채울 수 있다면 최소 파장 수는 4를 얻을 수 있다. 표 3은 4개 상자  $w_1, w_2, w_3, w_4$ 의 각 상자에 (s,t)들의 열 간선이 중복되지 않도록 채운 결과를 보여주고 있다. 결론적으로 파장 수는 4, 홑 수는 45를 얻었다.

본 논문에서 거론된 2개의 실험 망 데이터에 대해 RWAP의 성능을 비교한 결과는 표 4에 제시되어 있다.

표 4. 알고리즘 성능 비교

Table 4. Comparison of algorithm performance

망	평가 기준	채색 수	ISBPA	LFFP	MNH	LFAP	HPLD
$N_1$	파장 수	3	3	-	-	-	-
	홉 수	23	22	-	-	-	-
$N_2$	파장 수	-	4	6	4	4	4
	홉 수	-	45	45	45	47	49

제안된 ISBPA는  $N_1$  망에 대해서는 채색 수 알고리즘과 동일한 파장 수를 얻었지만 홉 수를 1개 감소시켰다.  $N_2$  망에 대해서는 MNH와 동일한 파장 수와 홉 수를 얻었다.

### V. 결론

본 논문은 NP-완전으로 분류되어 최적 해를 얻을 수 있는 다항시간 알고리즘이 제안되지 않고 있는 RWA에 대해 다항시간 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서 제안된 ISBPA는  $(s, t)$ 의 최단 광 경로로 동일한 홉 수를 갖는 주경로와 대체경로를 사전에 결정하고, 실제  $(s, t)$  통신이 요구될 때 이들 이중 경로를 이용하여 최소로 이용되는 간선을 결정하고, 파장 수 상자에 담는 방법으로  $O(kn)$  수행 복잡도로 최적 해를 구할 수 있었다.

2개의 실험 데이터 망에 적용한 결과, ISBPA는 기존에 알려진 최적 해를 모두 찾을 수 있음을 보였다. 따라서, 본 논문은 NP-완전으로 분류된 RWA에 대해 다항시간으로 최적 해를 얻을 수 있는 알고리즘이 존재함을 보였다.

### 참고문헌

- [1] H. Zang, J. Jue, and B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength Routed Optical WDM Networks," *Optical Networks Magazine*, Jan. 2000.
- [2] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WAN's," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 40, No. 7, pp. 1171-1182, Jul. 1992.
- [3] J. P. Jue, "Lightpath Establishment in Wavelength-Routed WDM Optical Networks," *Optical networks*, Kluwer Academic Publishers, pp. 99-122, 2001.
- [4] G. Z. Marković and V. S. Aćimović-Raspopović, "Solving the RWA Problem in WDM Optical Networks Using the BCO Meta-Heuristic," *Telfor Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 43-48, Jan. 2010.
- [5] C. Dzongang, P. Galinier, and S. Pierre, "A Tabu Search Heuristic for the Routing and Wavelength Assignment Problem in Optical Networks," *IEEE Communications Letters*, Vol. 9, No. 5, pp. 426-428, May 2005.
- [6] S. Baroni and P. Bayvel, "Wavelength Requirements in Arbitrarily Connected Wavelength-Routed Optical Networks," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 242-251, Feb. 1997.
- [7] J. H. Sreagar, H. Takagi, and Y. Zhang, "Efficient Routing and Wavelength Assignment in Wavelength-Routed Optical Networks," *Proceedings of 7th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium*, pp. 116-127, Oct. 2003.
- [8] D. Banerjee and B. Mukherjee, "A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, No. 5, pp. 903-908, Jun. 1996.
- [9] S. Even, A. Itai, and A. Shamir, "On the Complexity of Timetable and Multi-commodity Flow Problems," *SIAM Journal on Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 691-703, 1976.
- [10] C. Hendrik, "RFC 1058, Routing Information Protocol," *The Internet Society*, Jun. 1988.
- [11] G. Li and R. Simha, "The Partition Coloring Problem and its Application to Wavelength Routing and Assignment," *Proceedings of the First Workshop on Optical Networks*, pp. 1-19, 2000.
- [12] T. F. Noronha and C. C. Ribeiro, "Routing and Wavelength Assignment by Partition Colouring," *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, No. 3, pp. 797-810, Jun. 2006.

## 저 자 소 개



이 상 운(Sang-Un, Lee)

1983년 ~ 1987년 :  
한국항공대학교 항공전자공학과 (학사)

1995년 ~ 1997년 :  
경상대학교 컴퓨터과학과 (석사)

1998년 ~ 2001년 :  
경상대학교 컴퓨터과학과 (박사)

2003.3 ~ 현 재 :  
강릉원주대학교 멀티미디어공학과 부교수  
관심분야 : 소프트웨어 프로젝트 관리,  
소프트웨어 개발 방법론,  
소프트웨어 신뢰성, 그래프  
알고리즘

e-mail : [sulee@gwnu.ac.kr](mailto:sulee@gwnu.ac.kr)