

광전달망에서 최소 파장 수의 한계값을 구하는 실질적인 방법

正會員 이 종 원*, 박 구 현**, 이 창 희***

A Practical Approach for a Lower Bound of the Number of Wavelengths in WDM-based Optical Transport Networks

Jong Won Lee*, Chang-hee Lee**, Koohyun Park*** *Regular Members*

요 약

각 노드에서 파장별로 경로를 선정하는 광전달망에서 최소한의 파장 수를 이용하여 경로 선정 및 파장 할당 문제에서 발견적 해결 방법에 의하여 해를 구하려는 연구가 수행되고 있다. 이와 같은 연구에 기준 척도를 제공하기 위해서 본 논문에서는 광전달망에서의 경로 선정 및 파장 할당 문제에서 요구된 모든 연결(connection)을 제공하기 위하여 필요한 파장 수의 최소 한계값을 구하는 실질적인 방법을 제안하고 있다. 이 방법은 K 개의 최단 경로를 이용한 경로흐름 모형에 의한 방법이다. 제안하고 있는 방법이 일반적인 링크흐름 모형에 비하여 복잡도 및 해를 구하는 시간에 있어 효율적이면서도 링크흐름 모형과 동일한 해를 제공함을 몇 가지 통신망 예를 통하여 보인다.

ABSTRACT

Most of researchers have tried to find heuristic methods for near-optimal solutions of establishing light paths with minimum number of wavelengths in wavelength-routed optical networks. In order to provide a performance measure for heuristic approaches, we propose a practical approach for a lower bound of the number of wavelengths which is required to provide full connections in WDM-based optical transport networks. This method is based on a path-flow formulation using K-shortest paths for each connection. Compared with a general link-flow formulation, the proposed method has much lower complexity and so needs much less calculation time while it gives the same results as a general link-flow formulation in some sample networks.

*한동대학교 전산전자공학부
 **홍익대학교 산업공학과
 ***한국과학기술원 전기 및 전자공학과
 論文番號:96328-1015
 接受日字:1996年 10月 15日

I. 서 론

파장 분할 다중화(WDM: Wavelength Division Multiplexing) 기술에 기반을 둔 광전달망에 대한 연구가 선진 여러 나라에서 진행되고 있다[1, 2]. 이러한 광전달망에서는 하나의 광섬유에 여러 개의 파장을 다중화하여 사용함으로써 전송 용량을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라, 파장에 따른 경로 제어가 가능하기 때문에 통신망의 유연성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 광전달망이 구축되기 위해서는 광 필터 및 광 다중화/역다중화기와 같은 광학 소자의 개발 및 광 회선분배기와 같은 물리적인 장치의 개발이 필수적이지만, 광전달망의 효율적인 구축을 위한 경로 제어 및 파장 할당법과 같은 통신망 기술 개발 또한 요구된다.

광전달망에서는 서로 다른 연결(connection)이 동일 광링크를 통과할 때 이들은 서로 동일한 파장을 사용할 수 없다. 따라서 요구되는 연결의 경로를 어떻게 선정하고 또한 각 연결에 어떠한 파장을 할당하느냐에 따라 자원의 사용 효율이 결정될 것이다. 광전달망에서 이러한 문제를 경로 제어 및 파장 할당(RWA: Routing and Wavelength Assignment) 문제라고 칭한다[3]. 이러한 기술이 최근 관심을 끌고 있는 이유는 이용 가능한 파장 수가 제한되기 때문이다. 즉 전송 특성이 좋은 1550 nm 대역에서 이용 가능한 광섬유의 대역폭은 100~200 nm로 대단히 넓으나, WDM 통신망에서 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)의 사용을 전제할 경우 현재 이용 가능한 광섬유에서의 대역폭은 EDFA의 대역폭인 약 30 nm로 제한되며, 광섬유에서의 비선형 효과 등으로 인하여 파장 간의 간격이 제한된다. 이러한 제약 조건 때문에 현재 광전달망에서 하나의 광섬유에서 사용 가능한 파장 수는 8~16개로 예상되고 있다[2]. 따라서 통신망의 자원, 특히 파장을 효율적으로 사용하기 위한 RWA 방법에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

RWA 문제는 통신망의 조건 및 목적에 따라 여러 가지로 분류될 수 있다[3, 4, 5]. 먼저 광전달망의 노드에서 파장 변환기의 사용 유무에 따라 분류될 수 있다. 즉 모든 노드에서 파장 변환기를 사용할 경우 하나의 연결에 할당된 파장은 노드를 거쳐가면서 변경될 수 있다. 그러나 파장 변환기가 사용되지 않을 경

우에서는 한 연결은 송신원으로부터 수신원까지 통과하는 모든 노드에서 동일한 파장이 사용될 것이다. 파장 변환기를 사용하여 설정된 광경로는 VWP(Virtual Wavelength Path)라고 하며, 이러한 경우에 광전달망에서의 RWA 문제는 단순히 회선교환방식에서의 라우팅 문제와 유사하게 된다. 또한 RWA의 목적 함수는 연결이 시간에 따라 변하는 경우와 시간에 따라 거의 변하지 않는 경우에 따라 달라지게 된다. 요구되는 연결이 동적일 경우에는 RWA 문제는 “dynamic RWA”라 하며, 이 때 목적 함수는 이용 가능한 파장 수 내에서 호 불통 확률(call blocking probability)을 최소화 하는 것이 되거나, 혹은 원하는 호 불통 확률을 얻기 위한 파장 수를 최소화 하는 것이 된다. 그러나 연결이 정적일 경우에 RWA 문제는 “static RWA”라 하며, 이 때 목적 함수는 원하는 모든 연결을 제공하기 위하여 필요한 파장 수를 최소화 하는 것이 된다[3, 5, 6].

현재 연구의 초점은 사용자 간에 직접적인 광경로를 제공하는 전광통신망보다는 주요 도시 간을 연결하는 광전달망을 구축하는 것이다. 이와 같은 경우에서 각 도시 간의 시간에 따른 트래픽 변화율은 대단히 미미할 것이기 때문에 최소 파장수를 이용하여 각 연결에 정적인 광경로를 설정하는 것이 RWA 알고리즘의 목적이 된다. 이와 같은 RWA 알고리즘에서 최적의 해를 구하는 것은 “graph coloring” 문제와 동일한 문제로 귀결되기 때문에 NP-complete한 것으로 증명되어 있다[7]. 따라서 성능이 우수하고 계산량이 적은 경로 설정 및 파장 할당을 위한 여러 가지 발견적 해결 방법(heuristic approach)이 제안되고 있다[3, 5, 6, 7]. 그러나 이와 같은 연구에서의 문제점은 제안하고 있는 방법들이 어느 정도 성능을 지니고 있는가에 대한 기준 척도가 없다는 것이다. 이러한 기준값을 제공하기 위해서 요구되는 모든 연결을 위한 최소 파장수에 대한 한계값을 구하는 방법에 대한 연구가 요구되고 있다.

최소 파장 수의 한계값을 구하기 위하여 “cut-set”을 이용하는 방법이 제안되어 있다[5]. 이 방법은 통신망의 구조와 수요가 주어졌을 때, 통신망을 둘로 나눌 수 있는 모든 “cut-set”을 찾은 후, 각 “cut-set”의 링크를 통하여 전달되어야 하는 평균 연결 수를 이용하여 최소 파장 수의 한계값을 구하는 것이다. 그러나 이

러한 방법은 규칙적인 구조를 지닌 통신망에서는 모든 "cut-set"을 찾지 않고도 직감적으로 원하는 해를 제공하는 "cut-set"을 발견할 수 있기 때문에 하한 한계값을 구하는 데에는 장점이 있지만, 일반적인 통신망 구조에서는 모든 "cut-set"을 찾아야 하기 때문에 적용시키기에 어려움이 예상된다. 본 논문에서는 각 연결 간에 K 개의 최단 경로의 경로흐름 모형을 이용하여 최소 파장 수의 하한 한계값(lower bound)을 효율적으로 구할 수 있는 방법을 제안한다.

2장에서는 최소 파장 수의 하한 한계값을 구할 수 있는 최적화 모형화 방법에 대해 기술한다. 기술된 모형화 방법으로는 링크흐름 모형과 경로흐름 모형이 있다. 이 두가지 방법은 통신망의 규모가 커질 경우 결정변수 및 제약조건의 수가 커져 실질적인 해를 구하기가 대단히 어렵다. 따라서 결정변수 및 제약조건의 수를 줄여 실질적으로 하한 한계값을 구할 수 있는 K 개의 최단 경로의 경로흐름 모형을 제안한다. 3장에서는 제안하고 있는 방법이 링크흐름 모형과 동일한 해를 제공하면서도 효율적인 방법임을 격자형 통신망 구조와 유럽의 핵심 통신망의 예를 통하여 보인다. 최소 파장수의 한계값을 구하기 위하여 두 가지 방법에서 소요되는 시간과 결정 변수와 제약 조건의 수를 통하여 제안하고 있는 방법이 실질적이면서도 동일한 해를 구할 수 있음을 보인다. 4장은 결론이다.

II. 한계값 결정 최적화 모형

이 장에서는 물리적 토폴로지가 주어지고, 각 노드 간의 수요가 주어졌을 경우에 최소 파장 수의 한계값을 구하는 수학적 모델화에 대하여 기술한다. 이와 같은 하한 한계값은 WP를 VWP인 것처럼 모형화함으로써 구할 수 있다. 즉 모든 노드에서 주파수 변환기가 이용 가능하다고 가정된 상태에서 링크에서의 최대 파장 수를 최소화하도록 함으로써 WP를 이용한 최소 파장 수의 한계값을 구할 수 있다. 먼저 일반적인 경우의 링크 흐름 모형(link-flow formulation)에 의한 한계값 결정 모형화를 소개하고, 다음으로 후보 경로가 주어지는 경우의 경로 흐름 모형(path-flow formulation)에 의한 한계값 결정 모형화에 대해 기술한다.

2.1 링크 흐름에 의한 한계값 결정 모형

VWP를 이용하여 구한 최소 파장 수는 WP를 이용하여 얻은 최소 파장 수에 대한 하한 한계값이 된다. 이는 점을 이용하여 모형화한다. 먼저 송신 노드 s와 수신 노드 d 간의 요구되는 연결 수가 $\lambda_{s,d}$ 라 하자. 결정 변수 $X_{i,j}^{s,d}$ 는 링크 (i, j)을 통과하는 s-d 노드 간의 연결 수를 나타낸다. 만약 $X_{i,j}^{s,d}$ 가 결정되면 s-d 노드 간의 경로도 결정되게 된다. 그리고 각 링크 (i, j)을 통과하는 s-d 노드 간의 연결 수의 합을 최소화시키는 조건하에서 경로를 결정하면 목적하는 해를 구할 수 있다. VWP를 이용하여 구한 최대 파장수를 λ_{max} 라 하면, 다음과 같은 MILP(mixed integer linear programming) 문제로 이를 기술할 수 있다[8].

Minimize λ_{max}

Subject to

$$\sum_{j:(i,j) \in E} X_{i,j}^{s,d} - \sum_{j:(j,i) \in E} X_{j,i}^{s,d} = \begin{cases} \lambda_{s,d}, & i=s \text{의 경우} \\ -\lambda_{s,d}, & i=d \text{의 경우 } \forall (s,d) \in C, \\ 0, & i \neq s \text{ 혹은 } i \neq d \text{인 경우} \end{cases}$$

$$\sum_{(s,d) \in C} X_{i,j}^{s,d} \leq \lambda_{max} \quad \forall (i,j) \in E,$$

$$X_{i,j}^{s,d} \geq 0; \text{integer}, \quad \lambda_{max} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in E, \forall (s,d) \in C.$$

위의 수식에서 C는 연결을 요구하는 송신(s)-수신(d) 노드 쌍의 집합이며, E는 링크의 집합이다. 이러한 MILP 문제는 풀기가 대단히 어려우므로, 선형계획 문제로 완화(LP relaxation)시켜 최소 파장 수에 대한 하한 한계값을 구한다.

이러할 경우 위의 문제는 회선교환방식에서의 경로 결정 시에 최대 링크 용량을 최소화시키는 문제와 동일한 문제가 된다. 다음 장에서 살펴보는 바와 같이 위와 같은 선형계획법에 의하여 해를 구하는 경우에도 통신망의 규모가 커지면 제약 조건 및 결정 변수의 수가 증가하여 실질적으로 해를 구하기가 어렵다.

2.2 경로흐름 모형에 의한 하한 한계값 결정

일반적으로 링크흐름 모형에 비해 경로흐름 모형으로 모델링하면 문제가 단순해지고 해법의 복잡도(complexity)도 줄어든다. 경로흐름 모형은 각 송수신 노드 쌍 간의 후보 경로 집합이 주어진다고 가정하는

것이 일반적이다. 즉 하나의 연결은 통신망에서 송수신 간의 가능한 경로 중의 하나를 통하여 경로가 설정될 것이기 때문에 송수신 간의 가능한 경로들을 미리 선정하여 모형화하는 방법이다. 따라서 경로흐름 모형에서는 하나의 연결에 대해, 송신 노드와 수신 노드 간에 존재할 수 있는 가능한 모든 경로 중에서 하나의 경로를 선택하되 각 링크를 통과하는 경로에 할당된 파장의 합이 최소가 되게 하는 방법으로 모형화하여 필요한 파장 수의 하한 한계값을 구한다.

경로흐름 모형을 위해 링크흐름 모형을 조금 다른 표현을 사용한다. 먼저 모든 송수신 노드 쌍의 수를 C 라 하고, 각 송수신 노드 쌍에 일련번호를 할당한다. 또한 모든 송수신 노드 쌍 간에 후보 경로들의 총 수를 P 라하고 이들 역시 일련번호를 할당한다. 그리고 링크의 집합을 E 라 하고, 송수신 노드 쌍 j 가 요구하는 연결 수 λ_j 가 주어졌다고 가정한다. $A = [a_{i,j}]$ 를 path-pair incidence matrix로서 후보 경로 i 가 송수신 노드 쌍 j 를 연결하는 경로이면 $a_{i,j} = 1$, 그렇지 않으면 $a_{i,j} = 0$ 이다. $B = [b_{i,l}]$ 는 path-link incidence matrix로서 후보 경로 i 가 링크 l 을 포함하면 $b_{i,l} = 1$, 그렇지 않으면 $b_{i,l} = 0$ 이다. 결정변수 y_i 는 후보경로 i 에 할당되는 연결 수를 나타낸다. 그러면 VWP에서 필요한 최대 파장수를 λ_{max} 라 하면, 다음과 같은 MILP 문제가 된다[8].

Minimize λ_{max}

Subject to

$$\sum_{i=1}^P y_i \cdot a_{i,j} \geq \lambda_j, \quad j = 1, \dots, C,$$

$$\sum_{i=1}^P y_i \cdot b_{i,l} \leq \lambda_{max}, \quad \forall l \in E,$$

$$y_i \geq 0; \text{ integer}, \quad \lambda_{max} \geq 0.$$

이러한 MILP 문제는 풀기가 대단히 어려우므로, 역시 선형계획 문제로 완화시켜 최소 파장 수에 대한 하한 한계값을 구한다. 경로흐름 모형에서도 송수신 노드 쌍 간의 가능한 경로 후보들의 수가 많을 경우에는 P 의 값이 대단히 커지게 되어 문제의 결정변수 및 제약식의 수가 크게 증가하게 되므로, 링크흐름 모형의 경우와 유사하게 실질적인 해를 구하기 어렵

게 될 것이다. 그러나 만약 각 연결이 해당 송수신 노드 쌍의 K 개의 경로 내에서 원하는 경로가 선택된다고 가정할 경우, P 는 $K \cdot C$ 로 제한되어 문제의 복잡도는 크게 감소할 것이다.

본 논문에서 제안하는 방법은 각 송수신 노드 쌍 간에 경로는 K 개의 최단 경로 이내에서 선택된다는 가정 하에서 경로흐름 모형에 의한 최소 파장 수의 하한 한계값을 구하는 방법이다. 이와 같은 시도는 각 링크의 최대 용량이 최소화되기 위해서 대부분의 경로는 최단 경로를 택하는 경향이 있을 것이라는 가정에서이다. 다음 장에서는 경로흐름 모형에서 하한 한계값을 제공하는 최단 경로의 수를 얼마로 해야 할지에 대해 몇 가지 예를 통하여 살펴본다. 이를 통해 K -최단경로를 이용한 경로흐름 모형에 의한 방법이 광전달망에서 최소 파장 수의 하한 한계값을 구하는데 매우 효과적인 방법임을 보인다.

III. 적용 및 결과

2.2절에서의 제안한 방법에 대한 효용성을 몇 가지 통신망 예를 통하여 2.1절의 방법과 비교한다. 선택한 통신망 모델로는 $3 \times N$ 형태의 격자형 통신망과 유럽의 핵심 통신망이다.

3.1 $3 \times N$ 격자형 통신망

$3 \times N$ 통신망의 구조는 그림 1과 같은 형태를 지니고 있다. 이와 같은 격자형 통신망의 구조가 광전달망에서 가상적인 통신망 모델로 사용되는 이유는 우리 나라를 비롯한 많은 나라의 형태가 한쪽으로 긴 형태를 지니고 있기 때문이다. 그리고 요구하는 트래픽 양은 각 노드 간에 하나의 파장에 해당하는 트래픽을 요구하는 것으로 가정한다. 따라서 전체 트래픽 양은 $3 \times N$ 격자형 통신망에서 $3N(3N-1)$ 이 될 것이다.

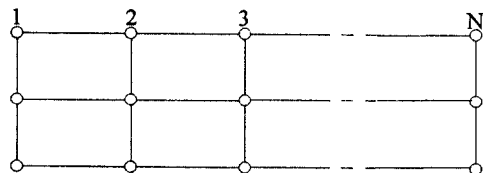


그림 1. $3 \times N$ 격자형 통신망 구조.

2절에서 기술한 방법에 의한 최소 파장수의 한계값이 N 이 3~12일 때 표 1에 나타나 있다. 또한 2.2절에서 제안한 방법에 대한 최소 파장수의 한계값은 각 송수신 노드 간에 사용된 최단 경로 개수에 따라 표시되어 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 2.2절에서 제안한 방법은 약 3개의 후보 경로가 주어지면, 2.1절의 방법과 동일한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

표 1. 최소 파장수에 대한 한계값.

통신망 구조	후보 경로가 없는 링크흐름 모형 (2.1 절)	K개의 후보 경로가 주어진 링크흐름 모형 (2.2 절)		
		K = 1	K = 2	K = 3
3×3	6	10	6	6
3×4	12	20	12	12
3×5	18	30	18	18
3×6	27	42	27	27
3×7	36	50	36	36
3×8	48	80	48	48
3×9	60	100	60	60
3×10	75	140	75	75
3×11	90	136	90	90
3×12	108	156	111	108

이 두 가지 방법에서의 복잡도를 결정변수의 개수 및 제약조건의 개수를 이용하여 비교하자[8]. 여기서 두 가지 방법에 대한 복잡도가 표 2에 비교되어 있다. 여기서 경로흐름 모형에서는 5개(K=5)의 최단 경로가 각 송수신 쌍 간에 주어진 경우이다. 표 2에서 보는 바와 같이 2.2절에서 제안하는 방법이 2.1절의 방법에 비하여 훨씬 적은 결정변수 및 제약조건을 가지고 있음을 알 수 있다.

제안하고 있는 방법이 결정 변수의 수와 제약 조건에서 적은 값을 지니고 있기 때문에 실질적인 해를 구하는 데에 적은 시간을 필요할 것이라고 추정할 수 있다. 실질적으로 해를 구하는 데에 소요된 시간이 그림 2에 나타나 있다. 해를 구하기 위하여 사용된 코드는 내부점 알고리즘(interior point algorithm)을 사용한 LOQO이며[9], 사용된 컴퓨터는 SUN SPARC 1이다. 그림 2에 나타난 바와 같이 후보 경로를 이용한

표 2. 두 가지 방법에서의 복잡도 비교

통신망 구조	링크흐름 모형(2.1 절)		경로흐름 모형 (K=5)(2.2 절)	
	결정 변수 수	제약 조건 수	결정 변수 수	제약 조건 수
3×3	1730	673	362	97
3×4	4490	1619	662	167
3×5	9242	3195	1052	255
3×6	16526	5563	1532	361
3×7	26882	8885	2102	485
3×8	40850	13323	2762	628
3×9	58970	19039	3512	787
3×10	81782	26195	4352	965
3×11	109826	34953	5282	1161
3×12	143542	45475	6302	1375

경로흐름 모형에서 실질적으로 해를 구하는 데에 소요된 시간은 링크흐름 모형에 비하여 대단히 적음을 알 수 있다. 또한 링크흐름 모형에서는 통신망의 크기가 커짐에 따라 소요 시간이 급격히 증가하는 경향을 나타낸다. 표 2에서 보는 바와 같이 링크흐름 모형에서 통신망의 규모가 더욱 커지면 결정변수 및 제약 조건의 수가 급격하게 증가하게 되므로, 일반적인 컴퓨터 환경 하에서는 메모리 자원의 부족으로 인하여 실질적인 해를 구할 수 없는 경우가 발생하게 된다.

또한 표 2는 모형 적용에 있어서 MILP 문제를 선형계획 문제로의 완화를 뒷받침한다. 즉 선형계획 문제로 완화시키지 않고 MILP 문제의 해를 그대로 구하려 한다면 3×5의 비교적 적은 규모의 격자망에 대

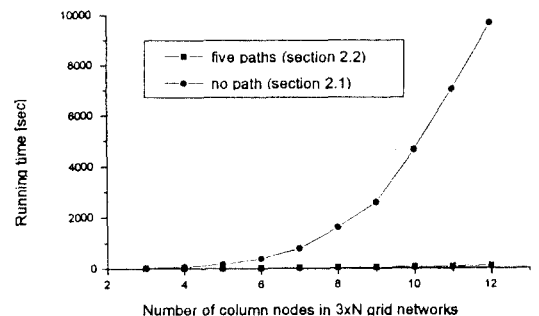


그림 2. 격자형 통신망 크기에 따른 소요 시간 비교.

해서도 정수형 결정변수의 수가 모형에 따라 각각 9244개, 1052개가 된다. 이는 통산적인 상업용 코드로 해를 구할 수 없음을 시사한다.

3.2 유럽의 핵심 통신망

유럽의 주요 11개 도시를 연결하는 광전달망의 구조 및 각 도시간의 요구된 연결 수가 [6]에 나타나 있다. 이 통신망의 구조는 격자형 통신망과는 달리 규칙적인 구조를 지닌 통신망이 아니다. 또한 각 도시간에 요구된 연결 수도 실질적인 트래픽을 고려하여 추정된 값이다. 이러한 통신망에서 링크흐름 모형에 의하여 구한 최소 파장수의 하한 한계값은 5.125개이다. 경로흐름 모형에서 후보 경로 수 $K=1$ 인 경우에는 최소 파장수의 한계값은 15개, $K=2$ 인 경우에는 5.25개, $K=3$ 인 경우에는 5.125개의 최소 파장수의 한계값을 나타내었다. 즉 이러한 실질적인 경우에 있어서도 제안하는 방법에 있어서 3개의 후보 경로를 선정하면 링크흐름 모형과 동일한 최소 파장수의 하한 한계값을 구할 수 있음을 알 수 있다. 실제에서 두 경우 모두 파장의 수는 단지 정수형 만을 취하므로 최소 파장수의 한계값은 $\lceil 5.125 \rceil = 6$ 으로 간주할 수 있다.

IV. 결 론

현재 광전달망에 대한 많은 연구 및 개발이 진행되고 있다. 이러한 연구 분야 중의 하나는 최소의 파장수를 이용하여 광경로를 구성하는 방법에 대한 연구이다. 이러한 RWA 문제는 NP-complete한 문제로 알려져 있기 때문에 효율적인 발견적 해결 방법을 찾으려는 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구에서의 문제점은 최적의 해를 알지 못하기 때문에 제안하고 있는 방법이 어느 정도 성능을 지니고 있는 지를 알지 못한다는 데에 있다. 그러나 최소 파장수의 한계값을 구하는 것은 2.1절에 나타난 바와 같이 원리적으로는 간단하나, 통신망의 크기가 커질 경우 실질적으로 해를 구하는 것은 쉽지 않다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최소 파장수의 하한 한계값을 K-최단 경로를 이용하여 경로흐름 모형에 의해 구하는 방법을 제안하였다. 이러한 접근 방법은 일반적인 링크흐름 모형에 비하

여 현실적인 규모의 광전달망에 대해 매우 효율적이면서 실질적으로 최소 파장 수의 하한 한계값을 구할 수 있음을 보여 주었다. 또한 제안된 방법에 의해서 구해진 최소 파장 수의 하한 한계값은 몇가지 해결 방법에 의한 RWA 알고리즘에 의해서 구해진 파장수와 비교해 볼 때, 매우 특성이 우수한 하한 한계값을 제공함을 알 수 있었다[10]. 제안된 방법에 의해서 구해진 최소 파장 수에 대한 한계값은 앞으로의 발견적 해결 방법에 의한 RWA 알고리즘의 성능을 측정하는데에 유용할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. C. A. Brackett and A. S. Acampora et al., "A scaleable multiwavelength multihop optical network: A proposal for research on all-optical networks," *IEEE J. Lightwave Technol.*, pp. 736-753, May/June 1993.
2. M. J. O'Mahony, D. Simeonidou, A. Yu, and J. Zhou, "The design of a European optical network," *Journal of Lightwave Technol.*, pp. 817-828, May 1995.
3. R. Ramaswami and K. Sivarajan, "Optimal routing and wavelength assignment in all-optical networks," *Proc. INFOCOM'94*, pp. 970-979, 1994.
4. R. A. Barry and P. A. Humblet, "On the number of wavelengths and switches in all-optical networks," *IEEE Trans. on Commun.*, pp. 583-591, Feb/Mar./Apr. 1994.
5. N. Nagatsu, Y. Hamazumi and K. Sato, "Optical path accommodation designs applicable to large scale networks," *IEICE Trans. Commun.*, pp. 597-607, April 1995.
6. L. Wuttisittikulkij and M. J. O'Mahony, "A simple algorithm for wavelength assignment in optical networks," *Proc. ECOC'95*, Th.A.2.4, pp. 859-862, 1995.
7. I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WAN's," *IEEE Trans. on Commun.*, pp. 1171-1182, July 1992.
8. W. L. Winston, *Introduction to mathematical pro-*

gramming, Duxbury Press, 1995.

9. R. J. Vanderbei, *LOQO user's manual*, Princeton Univ. Nov. 1992.

10. "초고속 광대역 광전달망에 대한 연구" 연말 보고서, 한국전자통신연구원, 1996.

이 종 원(Jong Won Lee) 정회원

1960년 1월 18일생

1978년 3월~1982년 2월: 서울대학교 전자공학과(학사)

1982년 3월~1984년 2월: 서울대학교 전자공학과(석사)

1991년 3월~1996년 2월: 서울대학교 전자공학과(박사: 컴퓨터통신분야)

1984년 3월~1997년 2월: 한국전자통신연구원 선임연구원

1997년 3월~현재: 한동대학교 전산전자공학부 전임강사

※주관심분야: 고속통신망 프로토콜, 통신망 성능분석, 트래픽 제어

e-mail: ljw@han.ac.kr

이 창 희(Chang-hee Lee) 정회원

1961년 9월 23일생

1979년 3월~1983년 2월: 한양대학교 전자공학과(학사)

1983년 3월~1985년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)

1985년 3월~1989년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사)

1989년 3월~1997년 1월: 한국전자통신연구원 선임연구원

1997년 1월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수

박 구 현(Koohyun Park)

정회원

1957년 3월 19일생

1976년 3월~1980년 2월: 서울대학교 산업공학과(학사)

1980년 3월~1982년 2월: 한국과학기술원 경영과학과(석사)

1985년 8월~1989년 5월: University of Wisconsin-Madison (박사: 최적화분야)

1982년 3월~1985년 8월: 동아대학교 산업공학과 전임강사

1989년 5월~1990년 1월: University of Wisconsin-Madison (Post-Doc.)

1990년 2월~1991년 3월: 한국전자통신연구소 지능망연구부 선임연구원

1991년 3월~현재: 홍익대학교 산업공학과 부교수

※주관심분야: 최적화, 통신망 분석 및 설계, 트래픽 제어 및 예측