

전광 WDM 링 통신망에서 수요집적 및 광파장 경로설정*

윤 문 길**

Traffic Grooming and Wavelength Routing for All Optical WDM-Ring Network*

Moon-Gil Yoon**

■ Abstract ■

In this paper, we address a problem of traffic grooming and wavelength routing in all optical WDM ring networks. Given a traffic demand for each node pair, we should aggregate the traffic onto lightpaths between pairs of nodes to transport the demand, and set up the routing path for each lightpath with minimum number of wavelengths to be assigned to lightpaths. In this paper, we formulate our problem as a mixed Integer Programming model. Owing to the problem complexity, it is hard to find an optimal solution for our problem. Hence, we develop a heuristic algorithm to solve our problem efficiently. From the computational experiments, we can find the proposed heuristic is very satisfactory in both the computation time and the solution quality generated.

Keyword : WDM, Ring Network, Traffic Grooming, Wavelength Assignment

1. 개 요

정보통신 기술의 발전과, 광대역을 필요로 하는 각종 정보통신 서비스의 등장은 통신망의 초고속화를 가속시키고 있다. 통신망의 초고속화는 광전

송기술의 발전으로 가능할 수 있는데, 각종 초고속 광전송 기술 가운데 최근에 두각을 보이는 것이 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기술을 이용한 광전송 방식이다[2]. 즉, 동일한 광케이블에 다수의 광파장(Wavelength)을 다중화하여 전송속

논문접수일 : 2000년 4월 24일 논문게재확정일 : 2000년 12월 8일

* 본 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 연구되었음.

** 한국항공대학교 경영학과

도를 획기적으로 증대시켜 광대역 서비스를 효과적으로 제공하는 것으로, 최근의 많은 통신사업자들은 WDM 방식의 광전송망 구축을 위한 투자를 시도하고 있다.

WDM 광전송망의 구축은 기존의 SDH/SONET 기반의 광전송망 구축에 비하여 노드에서 필요한 부분만 광/전변환(Optic/Electronic Transformation) 또는 전/광변환(Electronic/Optic Transformation)을 함으로써 전체적으로 광/전 변환에 따르는 손실을 최소화할 수 있다[5, 6, 12]. WDM 광전송망에서는 하나의 광파장에 정보를 실어 목적지 노드까지 전달하게 되는데, 다수의 광파장을 다중화하여 하나의 광케이블로 전송할 수 있기 때문에 기존의 광전송망에 비하여 더 많은 전송 용량을 확보할 수 있다. 이 경우에 동일한 광케이블 상에 같은 파장의 광파를 할당할 수 없기 때문에 서로 다른 광파장을 다중화하여 전송하는 광파장 할당 문제가 제기된다. 광파장의 할당을 위해서는 광전송 노드에서의 파장변환 방식에 따라 WP(Wavelength Path)와 VWP(Virtual Wavelength Path) 방식이 적용된다[2, 4, 8, 13]. WP 방식은 동일한 광파장을 이용하여 두 노드간의 연결을 설정하는 방식으로, 중계노드에서의 파장변환을 허용하지 않는 전송방식이다. 반면에, VWP 방식은 두 노드간의 연결을 위하여 중계노드에서의 파장변환을 허용하여 여러개의 광파장을 사용하여 경로를 설정하는 방식이다.

기존의 연구에서는 광전송망의 전송지연의 최소화 또는 소요파장의 최소화 등 주어진 목적에 따라 여러 가지 유형의 연구가 진행되었다. Topological 관점에서의 연구에서는 광파장 설치에 대한 수요가 주어진 경우, WP 방식 또는 VWP 방식으로의 경로설정 시에 최소한의 파장이 사용될 수 있도록 광파장의 경로설정과 파장할당 문제들이 다루어져 왔다[1, 3, 6, 9, 11, 14]. 또다른 연구방향이 광파장이 주어진 WDM 망에서 패킷 전송지연을 최소화하기 위한 패킷 경로설정 문제를 다루는 논리적 망설계 문제를 다루는 것이다[5, 9, 12].

Zhang and Acampora[14]는 광전송 수요가 주어진 경우의 광파장 재사용을 고려한 VWP 및 WP의 선정 문제를 다루었다. 특히, 광파장의 재사용을 고려하여 동일한 광파장으로 연결되는 광전송 수요를 최대화하도록 하였고, 발견적 해법을 적용하였다. Rawaswami and Sivarajan[12]은 WDM망에서 논리적 망설계문제를 고려하여 각 링크에 할당되는 최대부하를 최소화 할 수 있도록 광전송 수요의 경로설정 문제를 포함하는 설계문제를 다루었고, Mukherjee 등[9]은 주어진 전송수요에 대하여 일반적인 망구조하에서 평균 지연을 최소화하는 광파장 경로설정 및 파장할당 문제를 비선형계획법으로 정식화하였다. 특히, Mukherjee 등[9]의 연구에서는 효과적으로 발견적 실행가능해를 찾기 위하여 전체 문제를 4개의 부분제로 분할하고, 발견적 해법을 통하여 해결하는 방법을 적용하였다. 박구현과 우세현[1]의 연구에서는 광파장수가 주어진 경우에 노드쌍간의 연결공정성을 보장하면서 망효율을 최대화하기 위한 광파장 경로설정 및 파장할당 문제를 다루었다.

이같은 연구들은 대부분 광파장이 설치될 노드쌍이 주어진 경우 광전송을 위한 광파장의 경로설정문제와 그에 따르는 파장할당 문제들을 다룬 것이다. 따라서, 두 교환노드간의 전송수요가 광파장의 전송용량에 못 미치는 경우에도 하나의 광파장이 설치되어야 하기 때문에, 전송망에 과도한 투자를 하게 되는 결과를 갖게 된다. 기존의 연구들에서는 주어진 광전송 수요에 대하여 수요집적(Traffic Grooming)과정을 거쳐 광파장이 설치될 노드쌍이 주어진 경우를 대상으로 하여 파장할당 및 경로설정 문제를 다루어 왔다. 즉, 어떻게 주어진 광전송 수요를 광파장 전송용량 단위로 집적화할 것인지는 일부의 연구에서 고려되고 있을 뿐이다[7]. 이 같은 수요집적 문제는 전송시설의 효율적 이용이라는 측면에서 매우 중요한 문제이고, 이미 SONET/SDH 전송망에서는 다중화 계위에 따른 Demand Bundling 문제로 활발히 다루어져 왔다. 따라서, WDM망에서 수요가 광파장의 전송용

량 이하로 주어지는 경우 광파장의 전송용량까지 수요를 집적화하고, 설치될 광파장의 경로를 설정하는 것이 망의 효율적 운용이라는 측면에서 중요한 문제로 부각되고 있다[7]. 즉, 수요가 OC-3로 주어지고 광파장의 전송속도를 OC-48으로 가정하는 경우에는 하나의 광파장에 최대 16개의 전송수요를 집적화 함으로써 사용되는 광파장 수를 대폭 줄일 수 있게 된다. 수요집적과정의 중요성과 효과는 Modiano & Barry[7]의 연구를 참고할 수 있다.

본 연구에서는 교환노드간의 전송수요가 OC-1 단위로 주어진 경우, WDM 망에서 가능한 최소의 광파장으로 수요를 전송하기 위하여 각 전송수요를 집적화하고, 선정된 광경로의 최적 경로설정을 결정하는 문제를 다룬다. WDM 망 구조는 링을 가정하고 전송수요는 두 개 이상의 경로를 이용할 수 있도록 수요분할을 허용하는 것으로 가정한다. 목적함수는 모든 전송 수요를 처리하기 위해 필요한 광파장 수를 최소화하는 것이다. 광파장의 경로가 설정되면, WP 또는 VWP 방식에 따라 여러 가지 광파장 할당방법이 고려될 수 있고, 이 문제는 기존의 많은 연구에서 다루어져 왔으므로 본 연구에서는 수요의 집적과 광파장 경로선정을 대상으로 연구하고 광파장 할당문제는 다루지 않는다.

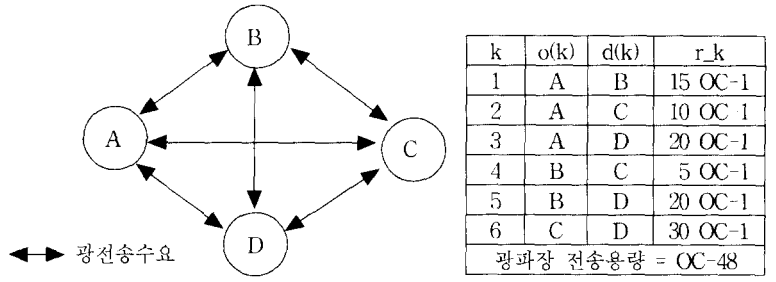
본 연구에서 다루는 문제를 보다 명확히 하기 위하여 4개의 노드로 구성되는 다음과 같은 WDM 링 예제를 고려해보자. k 는 두 노드간의 전송수요를 나타내기 위한 commodity를 나타내고, $o(k)$, $d(k)$ 는 각각 commodity k 의 출발지와 목적지를 나타낸다. r_k 는 $o(k)$ 와 $d(k)$ 간에 전송될 전송수요이고, Q_i 는 각 광파장의 전송용량을 나타내는데 모두 OC-48을 가정한다. [그림 1]의 (a)는 각 노드간에 주어진 광전송 수요량을 나타내고 있다. [그림 1]의 (b)에서는 모든 광전송 수요에 각각 광파장을 할당하는 경우로 최대 3개의 광파장이 필요하게 된다. [그림 1]의 (c)에서는 최대 2개의 광파장을 사용하여 모든 수요를 처리하도록 하고 있다. 이 경우 4개의 광파장 설치구간이 고려되고 두 개

의 광파장만 사용되지만, 수요집적과정에서 [그림 1]의 (d)와 같은 방식으로 모든 수요를 처리할 수 있게 된다. 즉, 노드 A와 노드 B의 수요는 λ_1 의 파장(VP)을 이용하여 노드 C까지 전송하고, 노드 C에서 노드 B로 가는 다른 전송 수요와 다중화 시켜 λ_2 의 파장을 이용하여 노드 B까지 전달되게 된다. 노드 A와 노드 D간의 수요도 동일한 방법으로 A-C간의 광파장과 C-D간의 광파장을 경유하여 연결되게 된다. 이러한 과정에 있어서 빈번한 광전 변환에 따른 전송지연이 고려될 수 있으나, 광전 변환횟수를 제한하여 전송지연을 일정한 수준 이하로 유지할 수 있다. 이때 A-C간의 광파장 경로에 동일한 파장을 할당(WP)할 것인지, B 노드에서의 파장변환을 허용할 것인지(VWP)의 문제는 파장할당 문제로서 본 연구에서는 다루지 않는다.

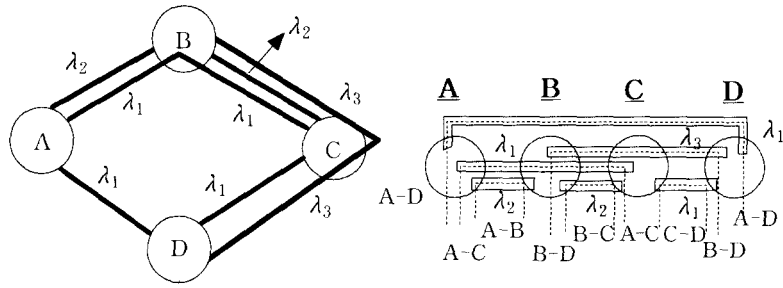
따라서, 본 연구에서는 WDM 링 상에서 주어진 광전송 수요를 다수의 광파장에 집적시키고, 이렇게 결정된 광파장에 대하여 WDM 링의 각 아크에서 사용되는 광파장 수가 최소가 될 수 있도록 광파장 전송경로를 설정하는 문제를 다룬다. 2장에서는 본 연구에서 다루는 문제에 대한 수리적 정식화 과정을 설명하고, 3장에서는 이 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 발견적 해법에 대하여 설명한다. 제안된 해법에 대하여 간략한 예제와 임의의 자료를 대상으로한 실험결과를 4장에 제시하고, 본 연구결과에 대한 의의 및 적용가능성과 향후 연구방향에 대하여 5장에서 논의한다.

2. 모형화 과정

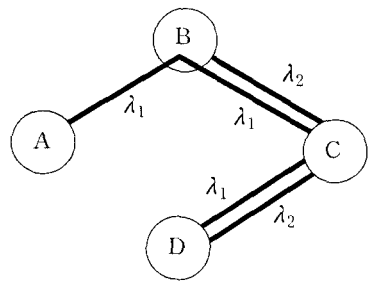
WDM 링에서 각 WDM 장비를 하나의 노드로 고려한다. 각 노드간에는 전송수요가 주어지고, WDM 링에 설치될 수 있는 광파장의 최대 전송용량이 주어진 것으로 가정한다. 이 경우에 모든 노드간의 전송수요를 제공하면서, WDM 링상의 각 아크에서 필요로 하는 최대 광파장 수를 최소화 할 수 있도록 각 전송수요의 경로를 설정해야 한다. 최적화 수리모형을 효과적으로 수립하기 위하여



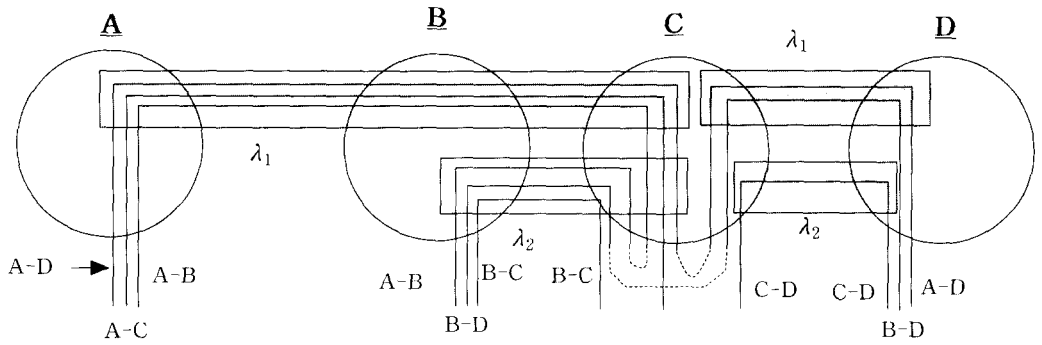
a) WDM 노드간 광전송수요



b) 수요집적을 고려하지 않는 WDM 노드간 광파장 경로설정



c) 수요집적을 고려한 WDM 노드간 광파장 경로설정

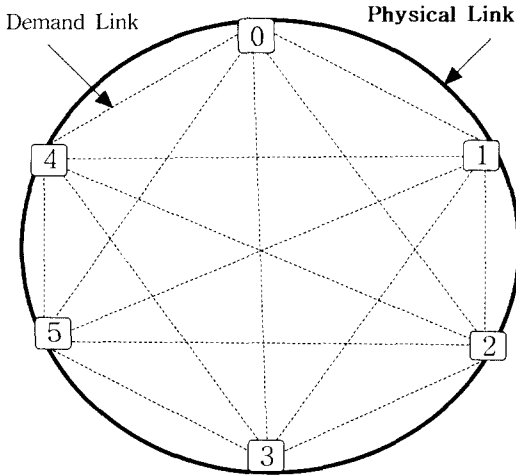


d) 광전송수요의 경로 및 광파장 경로설정

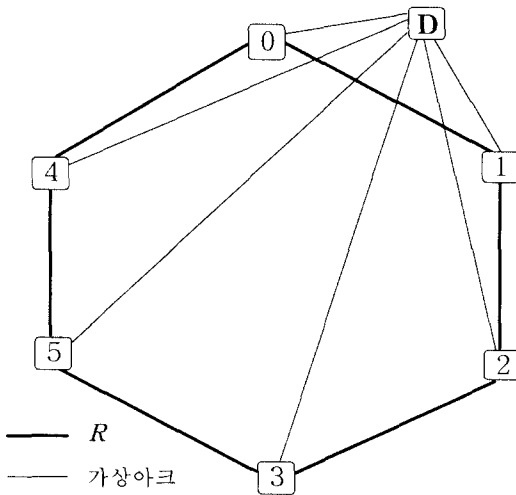
[그림 1] WDM 링에서 광전달 수요의 경로 및 광파장 경로설정

주어진 링에 가상노드 D와 가상아크를 추가한 확장된 망을 고려한다[그림 2]. [그림 2]의 (a)에서 실

선은 링을 구성하는 광케이블을 나타내고, 점선은 두 노드쌍간 수요의 존재를 나타내고 있다.



(a) WDM 링과 전송수요



(b) 가상노드 및 아크를 고려한 확장된 Ring

N_0 : WDM 노드 집합, $N = N_0 \cup \{D\}$,

R : 링상의 아크집합,

E : 가상아크를 포함하는 아크집합
($E = R \cup \{\text{가상아크}\}$)

A : E 로 부터 이어지는 양방향 아크 집합

[그림 2] WDM 링과 망 확장

우선, 각 노드 쌍간의 수요를 하나의 commodity k 로 정의하고, 모든 노드간에 각각 광파장이 설치될 수 있음을 고려하자. 따라서, 주어진 전송수요를 광파장에 적절히 집적화하고, 선정된 광파장을 WDM 링에서 최소의 광파장이 소요되도록 경로를

설정하게 된다. 설명의 편의를 위하여 다음과 같은 기호를 정의하자.

r_k : commodity k 의 수요량

$o_i(l), d_i(l)$: 광파장 l 의 출발 및 도착 노드

$o(k), d(k)$: commodity k 의 출발 및 도착 노드

L : 설치되는 광파장 l 의 집합

Q_l : 광파장 l 에 할당되는 전송용량

광파장의 경로설정시에 WDM 링의 동일한 아크에 동일한 광파장이 설정되는 것은 방지되어야 한다. 이때, 각 전송수요에 대하여 광파장 l 이 설치될 수 있는 경로는 가상노드를 이용하는 경우와 이용하지 않는 경우로 구분할 수 있다. 여기서, 각 commodity k 의 수요량을 광파장 l 을 이용하여 처리하는 경우에는 다음 사항을 고려해야 한다.

- 1) $i = o(k)$ 이면, $i = o_i(l)$ 또는 $d_i(l)$ 인 광파장 l 중에서 하나를 선택하여 commodity k 의 수요를 내보낸다.
- 2) $i = d(k)$ 이면, $i = o_i(l)$ 또는 $d_i(l)$ 인 광파장 l 중에서 하나를 선택하여 commodity k 의 수요를 받는다.
- 3) $i \neq o(k), i \neq d(k)$ 이면,
 - i) $i = d_i(l)$ 또는 $o_i(l)$ 이면, $i = o_i(l)$ 또는 $d_i(l)$ 인 광파장 l 로 들어온 k 의 수요는 $i = o_i(l)$ 또는 $d_i(l)$ 중에서 하나를 선택하여 k 의 수요를 내보낸다(VC 중계).
 - ii) $i \neq d_i(l), i \neq o_i(l)$ 이면, 광파장 l 을 이용하여 들어온 k 의 수요를 동일한 광파장을 이용하여 내보낸다(VP 중계).
- 4) k 의 수요는 광파장 l 이 설치된 경로로만 전송할 수 있고, 가상노드를 경유하는 파장은 이용하지 못한다.

이 같은 제약하에서 WDM 링의 각 아크에 설치되는 광파장의 최대수를 최소화하도록 최적화 모형을 수립하면 다음과 같다.

z_{ij}^l : (i,j)에 광파장 l의 설치유무를 나타내는 0,1 변수

x_{ij}^{kl} : (i,j)에서 광파장 l을 이용한 수요 k의 처리비율

y : (i,j)에 설치되는 광파장의 최대수

$L(i)$: i를 출발지 또는 목적지로 하는 광파장의 집합

$$[P] \text{ Min. } y, \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{l=1}^L z_{ij}^l \leq y, \quad (i,j) \in R, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} z_{ij}^l - \sum_{j \in N} z_{ji}^l = \begin{cases} 1, & i = o_l(l), \\ -1, & i = d_l(l), \\ 0, & \text{o.w.}, \end{cases} \quad i \in N \cup \{D\}, l \in L, \quad (3)$$

$$\sum_{l \in L(i)} \sum_{j \in N_0} x_{ij}^{kl} - \sum_{l \in L(i)} \sum_{j \in N_0} x_{ji}^{kl} = \begin{cases} 1, & i = o(k), \\ -1 & i = d(k) \quad i \in N, k \in K \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij}^{kl} - \sum_{j \in N} x_{ji}^{kl} = 0, \quad i \neq o(k), i \neq d(k), \text{ 또는 } i \neq d_l(l), \quad i \neq o_l(l), l \in L, k \in K, i \in N, \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} r_k(x_{ij}^{kl} + x_{ji}^{kl}) \leq Q(z_{ij}^l + z_{ji}^l), \quad (i,j) \in R, l \in L, \quad (6)$$

$$z_{ij}^l + z_{ji}^l \leq 1, \quad (i,j) \in R, l \in L, \quad (7)$$

$$x_{ij}^{kl} \geq 0, \quad (i,j) \in R, l \in L, k \in K, \quad (8)$$

$$z_{ij}^l \in \{0,1\}, \quad (i,j) \in E, l \in L, \quad (9)$$

$$y \geq 0, \text{ and integer}, \quad (10)$$

목적함수는 WDM 링에 설치되는 광파장의 수를 최소화하는 것이다. 제약식 (2)는 링상의 각 아크에 소요되는 광파장의 수에 대한 제약을 나타내고 있다. (3)은 각 광파장의 설치를 보장하기 위한 흐름보전제약식으로, |L|개의 광파장의 설치를 고려하는데 링 상에 설치되지 않는 광파장은 가상 노드를 경유하여 설치하도록 하고 있다. 각 전송수요에 하나의 광파장을 대응시키고, 전송수요가 광파장의 전송용량을 초과하는 경우에는 동일한 노드간에도 복수의 광파장을 설정하는 것으로 한다. 즉, 광파장의 설치가능 집합은 주어진 수요와 광파장의 전

송용량으로부터 쉽게 정의할 수 있다. (4)-(5)는 각 commodity의 수요를 충족시키기 위한 흐름보전제약식을 나타내고 있다. (6)은 광파장이 설치된 경로로만 k의 수요가 이용할 수 있고, 최대 이용할 수 있는 수요량은 Q_l 을 초과할 수 없음을 나타낸다. (7)은 광파장의 설정시에 양방향 중에서 하나의 방향으로만 설정되도록 하는 제약식이다. 즉, 양방향 중 어느 한 방향으로 광파장이 설정되어도 실제 수요의 흐름은 (6)에 의하여 양방향을 모두 이용할 수 있기 때문이다. 제약식 (4)의 경우는 commodity k의 출발지 또는 목적지에서는 그 노드에서 시작되는 광파장 중의 하나를 이용하여 수요를 내 보낼 수 있음을 나타내고 있고, 출발지 또는 목적지 노드가 아닌 경우에는 그 노드를 출발지 또는 목적지로 하는 광파장을 이용하여 수요를 중계하도록 하고 있다. (5)의 경우는 commodity k의 출발지 또는 목적지 노드가 아니면, 광파장 l의 출발지 또는 목적지가 아닌 경우에는 반드시 동일한 광파장 l을 이용하여 중계되어야 함을 나타내고 있다. 이 같은 제약식을 모두 만족하는 경우에는 노드쌍간에 주어진 전송수요가 모두 만족될 수 있고, 광파장의 전송용량을 공동 이용함으로써 설치되는 광파장 수를 최소화 할 수 있게 된다.

3. 발견적 해법

[P]는 혼합정수계획모형으로 수요집적 문제와 광파장 경로설정 문제가 통합된 매우 복잡한 문제이다. 이미 수요집적문제가 NP-Complete로 알려져 있어[7], [P]에 대해서는 최적해법의 개발보다는 빠른 계산시간 내에 해를 찾을 수 있는 발견적 해법의 개발이 효과적이다. 본 절에서는 [P]에 대한 효과적인 발견적 해법을 제시하고자 한다.

본 연구에서 제시하는 해법은 크게 두 부분으로 구성된다. 첫 번째 과정은 모든 commodity에 대하여 하나의 광파장으로 전송할 수 있는 광전송용량 범위 내로 수요를 집적시키는 과정이다. 이 과정에

서 가능한 설치되는 광파장의 수를 최소로 줄이도록 한다. 두 번째 과정은 설치될 광파장이 결정되면, 링 상에 광파장 전송경로를 설정하는 과정이다. 이때는 각 아크에 서로 다른 파장이 할당되도록 하고 필요로 하는 최대 광파장의 수가 최소가 되도록 경로를 설정하는데, 기존의 링상의 부하균형문제 (Ring Loading Problem)를 위해 개발된 해법[10]을 수정하여 적용할 수 있다.

수요의 집적과정은 노드간에 주어진 전송수요에 각각 서로 다른 광파장을 할당하는 것으로 시작한다. 이 때, 두 노드간의 광전송수요가 광파장 전송용량을 초과하는 경우에는 광전송 수요를 수용할 수 있는 수 만큼의 광파장이 두 노드사이에 설치되도록 한다. 이를 위하여 노드간에 할당되는 각각의 광파장을 아크로 하는 망을 고려한다. 이 망을 $G=(N, E^*)$ 로 표시하자. 여기서 N 은 WDM노드의 집합, E^* 는 광파장을 나타내는 아크의 집합을 나타낸다. 두 노드간에 다수의 광파장이 할당되어야 하는 경우에는 두 노드간에 다중 아크를 고려하여 해결할 수 있고 E^* 에 포함되도록 한다. 본 연구의 해법에서는 초기에 각 수요를 각기 다른 광파장에 할당한다. 따라서, commodity의 수 만큼 광파장이 필요하므로, 이 광파장의 집합 L 을 commodity의 집합 K 로 대체할 수 있다. 또한 각 광파장을 아크로 표현하는 G 에서는 아크집합 E^* 를 L 로 대체할 수 있다. s_k^l 은 commodity k 의 수요가 광파장 l 에 할당되는 양을 나타내는데, G 상의 아크 l 에 할당되는 수요량으로 표현할 수 있다. 따라서, $K(l)$ 을 아크 l 을 이용하는 commodity의 집합, ρ_l 을 아크 l 의 이용률로 정의하여 다음과 같이 계산할 수 있다: $\rho_l = \sum_{k \in K(l)} s_k^l / Q_l$. 따라서, 아크의 집합 L 에 대하여 ρ_l 이 제일 작은 아크 l^* 를 선택하고, l^* 를 이용하는 $K(l^*)$ 의 수요량 $s_k^{l^*}$ 를 다른 아크들로 대체할 수 있는지를 검토한다.

대체경로 선정은 다음 절차를 따른다. 즉, $K(l^*)$ 에 속한 각 commodity k 에 대하여 G 에서 $o(l^*)$

와 $d(l^*)$ 까지 l^* 이외의 아크를 이용하는 경로를 선택하는데, 아크의 이용률이 1보다 작은 아크만을 고려하여 대체경로를 설정한다. 이렇게 선택된 경로의 아크(파장)의 집합을 $P(k)$ 라 하고, 이 경로상의 여유률을 고려하여 최대여유용량 Δ_k 를 산출한다.

$$\Delta_k = \min \{1 - \rho_l ; l \in P(k)\}, k \in K(l^*).$$

$P(k)$ 집합이 존재하는 경우에는 l^* 를 이용하는 commodity k 의 수요량을 대체경로로 전환시키고, $P(k)$ 집합이 존재하지 않는 경우에는 commodity k 는 l^* 이외의 다른 아크는 이용할 수 없음을 나타내므로 반드시 필요한 아크가 된다. 만일 $K(l^*)$ 의 모든 commodity에 대한 조정결과 $\rho_{l^*} = 0$ 이라면 l^* 를 L 에서 제거시킨다. 이 같은 조정과정은 더 이상의 아크제거가 없을 때까지 반복하여 수요 집적을 통한 필요한 광파장 설치구간을 결정한다.

[수요집적과정-Traffic Grooming]

[Step 1] [초기화]

WDM 링과 수요로부터 $G=(N, E)$ 정의. $L=K$, $E=L$, $T=L$ 로 정의함.

$$s_k^l = \begin{cases} d_k, & k=l, \\ 0, & l \neq l, \end{cases} k \in K, l \in L,$$

$$K(l) = \begin{cases} k, & k=l \\ \phi, & k \neq l, \end{cases} k \in K, l \in L$$

[Step 2] [수요 조정아크 선택]

1) 각 아크의 여유률 계산;

$$\rho_l = \sum_{k \in K(l)} s_k^l / Q_l, l \in L$$

2) l^* 선택: $\rho_{l^*} = \min \{\rho_l ; l \in L\}$

[Step 3] [대체경로 선정 및 수요조정]

1) $k \in K(l^*)$ 선택 하여 $P(k)$ 선택.

2) $P(k) = \phi$ 이면, l^* 는 L 에서 제거.

3) $P(k) \neq \phi$ 이면, $\Delta_k = \min \{1 - \rho_l ; l \in P(k)\}$

산출.

$$i) \Delta_k < s_k^l \text{ 이면, } s_k^l \left\{ \begin{array}{l} s_k^l - \Delta_k, \quad l = l^*, \\ s_k^l + \Delta_k, \quad l \in P(k), \end{array} \right. \text{ 이고}$$

$P(k)$ 에 속한 아크의 ρ_l 조정.

$$ii) \Delta_k \geq s_k^l \text{ 이면, } s_k^l \left\{ \begin{array}{l} 0, \quad l = l^*, \\ s_k^l + s_k^r, \quad l \in P(k), \end{array} \right. \text{ 이고}$$

$P(k)$ 에 속한 아크의 ρ_l 조정.

4) 만일 $\rho_r = 0$ 이면, l^* 를 L 및 T 에서 제거.

[Step 4] [종료]

$L = \emptyset$ 면 종료, $L \neq \emptyset$ 면 [Step 2]부터 반복.

수요 집적과정이 종료되면, G 에는 광파장을 나타내는 아크 중에서 필요한 아크 집합인 T 만 남게 된다. 이 아크에는 하나의 광파장이 배정되어 각 commodity의 수요를 전달하는 데 이용된다. 이 과정에서 하나의 아크로 연결되는 수요는 동일한 파장으로 중간에 광/전 변환없이 전송되는 광파장에 대응되고, 두 개 이상의 아크를 경유하는 수요는 아크 수 만큼 중간에 광/전 변환을 거치는 것을 나타낸다. 두 번째 과정은 수요 집적과정에서 결정된 광파장을 링 상에 적절히 배치하여 링에서 요구되는 광파장의 수를 최소화하도록 하는 과정이다. 이를 위하여 기존의 Myung 등[10]의 Ring Loading Problem에서 제시된 해법을 이용한 발견적 방법을 적용하기로 한다.

수요 집적과정에서 결정된 광파장 수요의 집합은 T 가 되고, 각 광파장 수요를 commodity로 정의하자. d_k 를 수요 집적과정에서 결정된 광파장 수요 k 의 수요량이라 하고, T 의 각 commodity에 대하여 1로 정의한다. 광파장 수요는 링 상의 오른쪽 경로 또는 왼쪽 경로 상에 할당됨으로써 전송로를 설정하게 되는데, 링 상에서 소요되는 총 광파장의 수가 최소화되도록 경로를 선정해야 한다. 본 연구에서는 광파장 수요 집합 T 에 대하여, Myung 등[10]의 연구에서 제시된 균형부하(Load Balancing)해법을 수정하여 적용함으로써 링 상에 광파장 수요를 배정하고 그 결과에 따라 서로 다른

광파장을 할당할 수 있도록 하였다. Myung 등[10]의 연구에서는 SDH/SONET 링 망에서 수요의 분할을 허용하는 경우의 부하균형문제를 다항 계산 시간 내에 최적해를 찾을 수 있는 최적해법을 제시하였다. 그러나, 수요의 분할이 정수단위로 주어지는 경우에는 최적해를 보장할 수 없으므로 본 연구에서는 이들 연구에서 제시된 해법을 수정하여 적용한다.

x_k^l 를 l 번째 반복과정에서 광파장 수요 k 가 링 상의 시계방향 경로를 선택하는 수요량이라 하자. L_k^+, L_k^- 는 각각 광파장 수요 k 에 대하여 시계방향 경로의 아크집합과 반시계방향 경로의 아크집합을 나타낸다. 광파장 경로설정을 위하여 초기에는 모든 광파장 수요를 시계방향으로 배정한 후, 배정된 각 광파장 수요에 대하여 반시계방향으로 배정하는 경우의 총 광파장수의 감소여부를 검사하여 하나씩 개선시키는 방법을 적용한다. 초기의 수요배정이 끝나면, 링 상의 각 링크를 이용하는 수요의 집합을 정의한다. 즉, 아크 l 을 광파장 전송 경로로 포함하는 수요집합을 T_l^+ 또는 T_l^- 로 하고, 각각 시계방향으로 경로가 설정된 수요의 집합과 반시계방향으로 경로가 설정된 수요의 집합이라 하자. 초기의 수요 배정후에는 T_l^- 만 존재하고, T_l^+ 는 공집합이 될 것이다. 각 아크 l 에 대하여, l 을 경유하는 모든 광파장 수요량의 합을 $g(x, l)$ 이라 하면, 다음과 같이 계산된다.

$$g(x, l) = \sum_{k \in T_l^+} x_k^l + \sum_{k \in T_l^-} (d_k - x_k^l)$$

따라서, 수요 k 에 대하여 시계방향 아크에 할당된 수요량의 최대값과 반시계방향의 아크에 할당된 수요량의 최대값을 각각 계산하고, 그 값이 작은 방향으로 수요 k 의 수요량을 조정함으로써 링 전체에 배정된 광파장 수요량이 균형을 이루도록 한다. 이 같은 과정으로 모든 수요에 대하여 양방향의 수요균형이 더 이상 개선되지 않을 때까지 반복적으로 실행한다. 광파장 경로설정해법은 다음과

같다.

[광파장 경로설정해법]

```

[Initialization]
for each  $k \in T$  do
     $x_k^0 = d_k$ ;
[Rerouting]
for  $k=1, \dots, |T|$  do
begin
     $\delta^+ := \max_{i \in L_i} g(x^{k-1}, \delta)$ 
     $\delta^- := \max_{k \in L_k} g(x^{k-1}, \delta)$ ;
    if ( $\delta^+ > \delta^-$ ) then
        begin
             $\Delta := \min \{ \lceil \delta^+ / 2 \rceil, x_k^{k-1} \}$ ;
             $x_k^k := x_k^{k-1} - \Delta$ 
            for  $i \in T$  and  $i \neq k$  do
                 $x_i^k := x_i^{k-1}$ ;
        end;
    if ( $\delta^+ < \delta^-$ ) then
        begin
             $\Delta := \min \{ \lceil \delta^- / 2 \rceil, r_k - x_k^{k-1} \}$ ;
             $x_k^k := x_k^{k-1} + \Delta$ ;
            for  $i \in T$  and  $i \neq k$  do
                 $x_i^k := x_i^{k-1}$ ;
        end;
    end;
end;
    
```

※ 여기서, x_i^k 는 수요 i 의 k 번째 계산과정에서 시계방향 경로로 할당된 광파장 수요량을 나타내고, $[a]$ 는 a 를 초과하지 않는 정수를 나타낸다.

이상의 과정을 거쳐 단계적으로 문제를 해결하는 발견적 해법은 매우 복잡한 문제로 간주되는 WDM 망에서 수요집적과 광경로 설정문제를 비교적 쉽게 해결할 수 있는 방법이 된다.

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서 제시된 해법의 유용성을 살펴보기 위하여 실험망에 대한 최적해와의 차이를 살펴보기로 한다. 최적해는 상용 최적화도구인 CPLEX

를 이용하고, 주어진 수요의 유형에 따른 사용파장수 및 계산시간을 비교하기로 한다. 수요는 OC-1 단위로 모든 노드간에 주어지는 것으로 가정하고, 수요의 유형은 수요량이 적은 경우(유형 A), 중간인 경우(유형 B)와 많은 경우(유형 C)로 구분하여 살펴보기로 한다. 각 광파장의 전송 용량은 동일한 것으로 가정하고, 노드쌍간의 전송수요를 전송용량에 대한 비율로 고려하여 0과 1사이의 값을 갖는 임의의 난수를 이용하여 할당한다. 각 수요의 유형에 따라 고려되는 전송수요의 범위는 다음과 같고, 모든 노드쌍간에 수요가 존재함을 가정한다.

수요 유형	A	B	C
수요 범위	0.05 ~ 0.15	0.20 ~ 0.40	0.40 ~ 0.60

본 연구에서 제시된 최적화모형을 이용한 최적해는 CPLEX 프로그램을 이용하여 구하고, 발견적 해법은 C를 이용하여 프로그래밍한 후 실행가능해를 찾는다. 본 연구에서 고려하는 문제의 유용성을 살펴보기 위하여, 수요집적을 고려한 경우의 최소 파장수와 수요집적을 고려하지 않는 경우의 최소 파장수를 비교하였다. 또한, 발견적 해법의 유용성을 살펴보기 위하여 최적해와 발견적해의 비교 및 계산 시간을 비교하였다. 고려된 WDM 링은 4개의 노드를 포함하는 경우부터 20개의 노드를 포함하는 경우까지를 고려하였다. 20개의 노드를 하나의 링으로 연결하여 수요집적을 고려하지 않는 경우에는 최대 55개의 광파장이 필요하기 때문에 현실적으로 구현되기는 곤란하지만, 광전송 수요가 적은 지역을 포함하는 경우라면(수요유형 A) 현재의 기술로도 실현될 수 있기 때문에 분석대상에 포함하였다. 실험은 Pentium III/450MHz의 개인용 컴퓨터에서 실시하였고, 실험결과는 <표 1>에 정리되어 있다.

<표 1>에서 수요집적을 고려하여 광전송 수요를 할당하는 것이 최대 90%까지 광파장 수를 절감할 수 있음을 볼 수 있다. 즉, 수요유형 A의 경우 노드가 8개인 WDM링에서 각 전송수요에 광파장

〈표 1〉 수요집적 및 광전송경로 선정 계산결과

노드수	K	수요 유형	수요집적을 고려한 광파장 경로선정				수요집적을 고려하지 않은 광파장 경로선정 소요광파장수
			최 적 해		발 견 적 해 법		
			소요광파장수	계산시간(Sec.)	소요광파장수	계산시간(Sec.)	
4	6	A	1	0.01	1	0.01	3
		B	1	0.03	1	0.01	3
		C	2	0.16	2	0.01	3
5	10	A	1	0.29	1	0.02	3
		B	2	1.25	2	0.02	3
		C	3	1.12	3	0.02	3
6	15	A	1	3.81	2	0.03	6
		B	2	11.45	4	0.03	6
		C	3	11.49	4	0.03	6
7	21	A	1	91.74	3	0.04	6
		B	3	754.07	5	0.05	6
		C	4	4,745.27	5	0.03	6
8	28	A	1	312.82	4	0.06	10
		B	-	***	5	0.04	10
		C	5	3,619.32	8	0.04	10
10	45	A	-	***	4	0.04	15
		B	-	***	9	0.10	15
		C	-	***	11	0.12	15
15	105	A	-	***	13	0.36	28
		B	-	***	19	0.37	28
		C	-	***	23	0.38	28
20	190	A	-	***	25	1.11	55
		B	-	***	35	1.08	55
		C	-	***	42	1.03	55

|K| : Commodity 집합 K의 원소의 수.

*** : 계산시간 5시간 이내에 CPLEX를 이용하여 최적해를 발견하지 못함.

을 할당하는 경우에는 10개의 광파장이 필요하지만, 수요집적을 고려하는 경우에는 하나의 광파장으로 수요를 처리하는 것이 최적해임을 알 수 있다. 규모가 작은 링에서는 최적해와 발견적해의 차이점을 찾아보기 어려우나, 링의 크기가 커짐에 따라 발견적 해가 최적해에 비하여 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, 수요가 적은 경우(수요유형 A)에 이같은 현상이 두드러지게 나타나는데, 발견적 해법에서 제시한 수요집적 과정이 최적해를 찾기에는 다소 비효율적인 것이기 때문으로 보인다. 그러나, 수요량이 커지는 경우에는 그 차이가 줄어들고 있음을 볼 수 있다.

본 연구에서 제시된 발견적 해법이 최적해에 비하여 소요되는 광파장수를 다소 많이 요구하고 있

지만, 계산시간을 살펴보면 매우 획기적인 것을 알 수 있다. 즉, 링의 크기가 커지는 경우에도 발견적 해법에서는 최대 1.2초 안에 실행가능해를 제시하고 있으나, 최적해를 찾는 CPLEX의 계산시간은 단지 노드 7개의 링에서조차도 1시간 이상의 계산시간이 소요됨을 알 수 있고, 노드가 10개 이상인 경우에는 5시간 이내에 최적해를 확인할 수 없었다. 따라서, 링의 크기가 커지면 CPLEX를 이용한 최적해를 구하는 것이 불가능하게 되고, 발견적 해법이 적절한 방법이 된다. 이러한 점에서 본 연구의 발견적 해법에서 제시된 해가 최적해와 다소 차이가 있다하더라도 짧은 계산시간내에 좋은 실행가능해를 제시하는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

WDM 장비를 이용한 전광 전송망에서는 광전송 수요를 효과적인 경로 설정을 통하여, 사용되는 광파장 수를 최소화할 필요가 있다. 이것은 WDM 전송망을 경제적으로 구현하기 위한 것 뿐만아니라, WDM 전송망의 이용효율을 높이기 위한 것이다. 즉, 주어진 수요에 대하여 최소의 광파장이 이용되도록 광전송경로를 할당하는 경우에는, 나머지 광파장을 이용하여 추가로 발생하는 수요 또는 변동되는 수요를 신속하고 효과적으로 처리할 수 있기 때문이다. 따라서, 본 연구에서 다루는 수요집적 및 광파장 경로설정문제는 단순히 망설계 문제에만 적용되는 것이 아니라 구축된 WDM망의 운영에도 적용될 수 있다.

WDM 망설계에 관한 많은 연구에도 불구하고, 본 연구에서 다루는 수요집적 문제와 광파장 경로 선정 문제의 통합연구는 문제의 복잡도로 인하여 많은 연구가 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 이 같은 문제를 해결하기 위한 최적화 모형을 혼합정수계획 모형으로 정식화하였다. 모형 수립시에는 망의 생존도를 고려하여 링구조를 가정하였고, 전송지연은 고려사항에서 제외하였다. 광파장 경로가 결정된 이후의 파장할당문제는 WP 및 VWP 방식에 따라 효과적인 기존의 해법을 활용할 수 있으므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 수립된 모형으로부터 빠른 계산시간 내에 비교적 좋은 실행가능해를 찾을 수 있는 발견적 해법을 개발하였다. 제시된 발견적 해법의 유용성을 살펴보기 위하여 최대 20개 노드로 구성되는 WDM 망에서 모의실험을 실시하였다. <표 1>의 실험결과에서 볼 수 있듯이 수요집적을 고려하는 것이 더 적은 광파장이 소요됨을 알 수 있고, 특히, 전송 수요가 적은 양으로 주어지는 경우에는 그 차이가 매우 크게 나타나고 있다. 최적해와 발견적해의 비교에서는 광전송 수요가 작게 주어지는 경우를 제외하고는 소요 광파장수에서는 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 계산 시간 면에서는 발견적 해법이 월등히 우수한 것으

로 나타나고 있다. 따라서, 부문제인 수요집적문제가 NP-Complete의 계산복잡도를 갖는 문제임을 고려하면, 본 연구에서 제시한 발견적 해법이 효과적인 것으로 판단할 수 있다.

본 연구에서 제시한 발견적 해법이 빠른 계산시간 내에 효과적인 실행가능해를 제시하기 때문에, WDM 링의 설계시 뿐만아니라, 망 운영시에도 효과적으로 이용될 수 있다. 즉, 시간에 따라 변화하는 광전송 수요를 WDM 망에서 처리하기 위해서는 매 시점 사용되는 광파장수가 최소가 되도록 운영하는 것이 바람직하다. 따라서, 주어진 전송 수요에 대하여 WDM망 전체를 대상으로 한 광파장 경로설정 및 파장할당을 매우 빈번하게 변경시켜야 한다. 이 같은 변경과정이 매우 짧은 시간내에 이루어져야 하는데, 본 연구에서 제시된 발견적 해법이 이 같은 문제의 해결에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 보다 현실적인 적용을 위하여 파장할당 문제도 동시에 고려될 수 있는 통합모형으로의 확장과 생존도를 고려한 문제 등으로 연구가 확장되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 박구현, 우재현, "WDM 광전달망에서 공정성을 갖는 경로설계 및 파장할당", 한국경영과학회지, 제22권, 제4호, 17-36, 1997.
- [2] 이성은, 서완석, "광전달망 기술현황", 주간기술동향 797, 1997. 5. 21.
- [3] Banerjee, D. and B. Mukherjee, "Practical approaches for routing and wavelength assignment in large all-optical wavelength-routed networks", IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol.14, June 1996.
- [4] Caenegem, B.V., W.V. Parys, F.D. Turck and P.M. Demeester, "Dimensioning of survivable WDM networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.16, Sept. 1998, 1146-1157.

- [5] Kamal, A.E. and G.K. Janssens, "Design, performance and wavelength assignment of a wavelength division multiaccess protocol for optical fibre ring networks", *Computer Networks* 31 (1999) 2391-2410.
- [6] Miyao, Y. and H. Saito, "Optimal design and evaluation of survivable WDM Transport Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.16, 1998, 1190-1198.
- [7] Modiano, E. and R. Barry, "Architectural considerations in the design of WDM-based optical access networks", *Computer Networks*, Vol.31, 1999, 327-341.
- [8] Mukherjee, B., "WDM-based local lightwave networks part II : Multihop systems", *IEEE Networks*, July 1992, pp.20-32.
- [9] Mukherjee, B., D. Banerjee, S. Ramamurthy and A. Mukherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.4, 1996, pp.684-673.
- [10] Myung, Y.S. H.G. Kim and D.W. Tcha, "Optimal load balancing in SONET bidirectional rings", *Operations Research*, Vol. 45, 1997, pp.148-152.
- [11] Ramaswami, R. and K.N. Sivarajan, "Optimal routing and wavelength assignment in all-optical networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.3, pp.489-500, Oct. 1995.
- [12] Ramaswami, R. and K.N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.14, 1996, pp.840-851.
- [13] Rouskas, G.N. and M.H. Ammar, "Analysis and optimization of transmission schedules for single-hop WDM networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3,1995, pp.211-221.
- [14] Zhang, Z. and S. Acampora, "A heuristic wavelength assignment algorithm for multi-hop WDM networks with wavelength routing and wavelength re-use", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.3, 1995, pp.281-288.