

WDM 광전달망에서 공정성을 갖는 경로설계 및 파장할당*

박구현** · 우재현***

A Design of Routing Path and Wavelength Assignment with Fairness in WDM Optical Transport Network*

Koohyun Park** · Jae-Hyun Woo***

Abstract

This paper considers the efficient design of routing path and wavelength assignment in the single-hop WDM optical transport networks. The connection demands between node-pairs are given and a connection between a pair of nodes must be made by only one lightpath. It is assumed that no wavelength conversion is allowed and the physical topology of the network and the number of available wavelengths of a physical link are also given.

This paper proposes the method to route a path and assign a wavelength to the path, which guarantees fairness to every node pair. In order to guarantee fairness and maximize connections, an optimization model is established, which successively maximizes minimum connection ratio to the demand of each node pair. A heuristic algorithm with polynomial iterations is developed for the problem since the problem is NP-hard. The heuristic algorithm is implemented and applied to the networks with real problem sizes. The results of the application are compared with GAMS/OSL.

* 본 논문은 정보통신부 대학기초연구지원사업(과제관리번호:96184-CT-11)의 지원금에 의해 수행되었음.

** 홍익대학교 산업공학과

*** 대우 정보시스템 EMS 시스템부

1. 서 론

WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기술에 기반을 둔 광전달망에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. WDM방식을 이용하면 하나의 광섬유에서 여러 개의 파장을 이용할 수 있어 전송속도를 향상시킬 수 있다. 그러나 광섬유의 물리적 특성 및 관련 응용소자의 기술적 제약으로 이용 가능한 파장의 수는 제한된다. 따라서 두개의 연결(connection)이 동일한 링크를 경유할 때 이들에게 동일한 파장을 할당할 수 없기 때문에 노드간 연결경로를 어떻게 선정하고 각 연결에 어떠한 파장을 할당하느냐에 따라 파장의 효율성과 연결 공정성이 결정된다.

WDM 광전달망에서 광경로(lightpath)의 경로 설정 및 파장할당 방법과 관련된 연구는 크게 두 가지로 분류해 볼 수 있다. 첫째, 연결 수요가 고정된 상황에서 단일홉(single-hop) 경로설계 및 파장할당 연구이다. 이 분야의 연구는 다시 사용 파장수가 주어질 때 망효율을 최대화하는 경로설계 및 파장할당 연구[1,8,9,10]와 연결수요를 만족시키는데 필요한 파장 수를 최소화하는 경로설계 및 파장할당 연구[9,10]로 분류할 수 있다. 둘째, 고정된 수요 하에서 경로설계 및 파장할당 방법에 의해 광경로를 미리 설계하고, 설계된 광경로 상에서 연결요청 호에 대한 호거절확률(blocking probability)을 줄일 수 있는 실시간(real time) 호별 다중홉(multi-hop) 경로배정 및 파장할당 제어 연구이다. 여기서 단일홉 경로란 노드쌍간의 신호 전송을 미리 설정된 하나의 광경로만을 이용한다는 의미이고, 복수개의 광경로를 연결하여 전송한다면 그것은 다중홉 경로가 된다. 따라서 실시간 호연결을 위해 단일홉 경로를 전제로 하느냐, 복수홉 경로를 전제로

하느냐는 광경로를 설계하고 파장 할당할 때 영향을 주게 된다.

본 논문은 위에서 분류한 첫 번째 연구에 해당되며 그 중 파장 수가 주어진 상황에서 망효율을 최대화하는 연구라고 볼 수 있다. 즉, 노드쌍간의 연결수요는 주어져 있고, 파장변환기로 인한 파장변환을 허용치 않고 망의 물리적 토폴로지는 주어진다고 가정한다. 같은 상황에 대한 관련연구 중 Ramaswami & Sivarajan[9]은 전체적인 연결수의 합을 최대화하는 경로설계 및 파장할당 방법을 제시하였고, Wauters & Demeester[10]은 전체적인 연결수의 합을 최대화하면서 동시에 연결경로의 길이를 최소화하는 경로설계 및 파장할당 방법을 제시하였다. 이에 비해 본 연구에서는 연결을 요구하는 노드쌍간의 연결비율로 표현되는 연결 공정성을 보장하면서 연결수의 합을 최대화하는 경로설계 및 파장할당 방법을 제시하고자 한다.

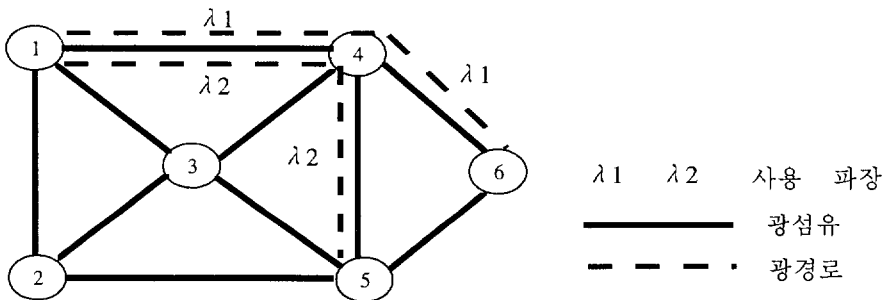
본 연구 저자들은 회선교환망인 경우, 즉 모든 노드에 파장변환기가 있는 WDM 광전달망의 경우, 노드쌍간의 연결 요구에 대해 공정성을 보장하면서 연결수의 합을 최대화하는 연구를 수행한바 있다.[1,2] 따라서 본 연구는 회선망에서의 공정성과 망효율성을 갖는 경로설계 연구를 파장변환기를 허용하지 않는 WDM 광전달망으로 확장한 연구에 해당되며, 같은 WDM 광전달망 경로설계 측면에서는 연결수를 최대화하는 Ramaswami & Sivarajan[9] 및 Wauters & Demeester[10]의 연구에 노드쌍간 연결 공정성을 포함시킨 연구라 할 수 있다.

본 논문의 구성은 2절에서 WDM 광전달망의 경로설계 및 파장할당의 특성을 소개하고, 3절에서는 공정성과 망효율성을 보장하는 최적화모형을 수립하였으며, 4절은 발전적 알고리즘과 알고리즘 적용 예를 보인다. 마지막으로 5절은 결론이다.

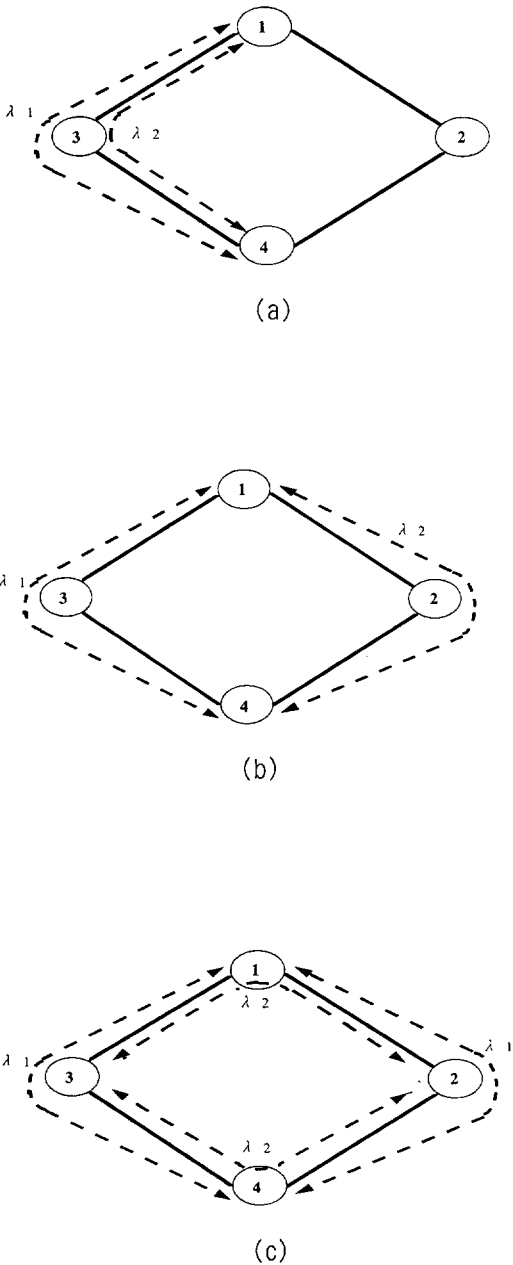
2. 경로설계 및 파장할당

WDM 광전달망에서 광경로는 두 노드간을 연결하는 하나의 경로로 그 경로에는 특정의 파장이 할당된다. [그림 2-1]에는 2개의 광경로가 표시되어 있다. 노드1과 노드6을 연결하는 광경로 1-4-6에는 λ_1 파장이 할당되었으며, 노드1과 노드5간에는 경로 1-4-5와 파장 λ_2 가 할당되어 있다. 파장변환이 허용되지 않을 경우 이처럼 한 경로에 한 개의 파장만이 할당됨으로써 경로에 포함된 링크들은 같은 파장을 할당받아야 한다. 이것을 파장 연속성의 제약(wavelength continuity constraint)이라고 한다.[4] 또한 [그림 2-1]의 링크(1,4)처럼 만약 두 개의 광경로가 하나의 링크를 공유한다면 이 두 광경로는 같은 파장을 할당받을 수 없다. 즉, 각 링크에는 하나의 파장이 한 번만 할당된다. 만약 한 링크에 대해 같은 파장이 중복되어 할당되면 파장충돌(wavelength conflict)이 일어난다고 한다. 이러한 파장 연속성의 제약과 파장충돌 현상은 WDM 광전달망에서 광경로 설계를 회선망의 경로설계보다 복잡하게 만드는 이유가 되며, 경로설정 및 파장할당 문제의 특성을 결정 짓는 근거가 된다.

파장 연속성의 제약과 파장충돌 현상으로 인하여 WDM 광전달망에서 노드쌍간의 연결경로 설정 및 파장할당은 망성능에 많은 영향을 주게 된다. [그림 2-2]는 경로설계 및 파장할당이 망성능에 어떤 영향을 주는 지를 보여준다. 이용 가능한 파장이 λ_1, λ_2 두 개라고 가정하고, 노드쌍간의 연결요구는 노드1과 노드4, 노드2와 노드3간에 각각 두 개라고 가정한다. 그러면 [그림 2-2]와 같이 (a),(b),(c)의 3가지 경로설계 및 파장할당 방법을 생각할 수 있다. 먼저 (a)처럼 노드1과 노드4간의 2개의 연결을 모두 경로 1-3-4로 하여 파장 λ_1 과 λ_2 할당한다면 노드2와 노드3간에는 파장충돌로 인해 어떤 경로 어떤 파장으로도 연결할 수 없게 된다. 만약 (b)처럼 노드1과 노드4간의 2개의 연결을 경로 1-3-4와 1-2-4로 하여 각각 파장 λ_1 과 λ_2 를 할당한다면 이 때에도 노드2와 노드3간에는 파장충돌로 인해 어떠한 연결경로도 불가능하게 된다. 그러나 (c)처럼 노드1과 노드4간의 연결경로를 (b)와 같이 경로 1-3-4와 1-2-4로 연결하여도 모두 λ_1 의 파장을 할당한다면 노드2와 노드3간에 2개의 연결이 가능해진다. 이처럼 연결을 요구하는 노드쌍간에 연결경로를 어떻게 설정하고



[그림 2-1] WDM 광전달망에서의 광경로



[그림 2-2] WDM 광전달망에서의 경로설계 및 파장할당의 예

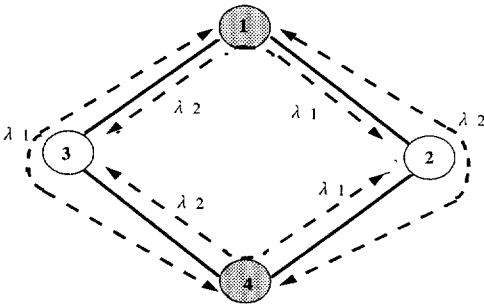
파장할당을 어떻게 하느냐에 따라 망성능에 큰 영향을 준다. 이러한 점에서 효율적인 경로설계 및 파장할당이 요구된다 하겠다.

[그림 2-2]의 (b)와 (c)에서 파장할당과 관련하여 파장재사용(wavelength reuse) 개념을 생각할 수 있다. 노드1과 노드4간의 2개의 연결경로는 (b)와 (c)가 동일하지만 파장할당 측면에서 보면 (b)는 λ_1 , λ_2 를 모두 사용한 반면 (c)는 λ_1 을 재사용(reuse) 하였다. 이러한 파장의 재사용을 될수록 많이 이용하는 방향으로 파장을 할당하는 것이 파장자원의 효율적 사용 측면에서 바람직하다. 이처럼 λ_1 하나만으로도 연결할 수 있는 것을 λ_2 을 이용하여 연결하였다면 파장 하나를 낭비하는 결과를 일으킬 뿐만 아니라, 이것은 후에 있을 다른 노드쌍간의 연결에 대한 파장할당에서 파장충돌 확률을 높이는 요인이 된다.

파장 연속성의 제약과 그로 발생하는 파장충돌은 파장변환기(wavelength converter)를 이용하여 완화시킬 수 있다. 파장변환기란 광신호를 전기신호로 바꾸지 않고 파장을 변환하는 장치로 파장의 충돌을 피하여 파장의 재사용을 높여 망이 보다 큰 전송능력을 가질 수 있게 하는 장치다. [그림 2-2]의 (b)에서 노드1과 노드4에 파장변환기가 있다면 [그림 2-3]와 같이 노드2와 노드3간에도 두 개의 광경로를 설정할 수 있다. 검게 표시된 노드1과 노드4는 파장변환기능을 갖춘 노드이다.

파장변환기는 하나의 파장에 대해 변환이 가능한 전용변환기(dedicated converter)와 입력된 여러 파장을 각각 다른 원하는 파장으로 바꾸는 겸용변환기(shared converter)가 있다. 만일 모든 노드에서 모든 파장에 대해 변환이 가능하다면 WDM 광전달망에서의 광경로 설계는 회선망에

서의 경로설계와 같아질 것이다. 그러나, 파장변환기는 매우 고가의 장비일 것으로 예상되고 모든 노드에서 이를 설치하게 될 때 망운영도 복잡하게 될 것으로 예상되므로 모든 노드에서 모든 파장에 대해 파장변환이 가능한 망을 구축한다는 것은 기술적으로나 경제적으로 적절한 대안이 아니라고 생각된다. 다만 파장변환을 가정한 연구는 파장변환을 허용하지 않는 WDM 광전달망에서의 연구 결과에 대한 한계치를 제공하여 연구 결과의 평가 기준을 제공할 수 있다.



[그림 2-3] 파장변환기를 이용한 경로설계 및 파장할당의 예

3. 최적화 모형

WDM 광전달망에서 공정성을 갖는 경로설계 및 파장할당 최적화 모형은 참고문헌 [1]의 회선망에서의 공정성을 갖는 최적화 모형과 비슷하다. 회선망에서는 회선들에 의해 각 링크의 회선용량을 초과하지 않는 범위내에서 연결경로를 설정할 수 있는 반면에 WDM 광전달망에서는 파장 연속성의 제약과 파장충돌을 허용하지 않는다는 제약조건을 추가로 만족하면서 연결경로를 설정해야 한다는 차이점이 있다. 최적화 모형에 사용되는 기호 및 표현을 정리하면 다음과 같다.

$G = (N, E)$: 무방향 네트워크로 N 은 노드집합이고 E 은 무방향 링크집합이다. 링크 (i, j) 와 링크 (j, i) 는 구분하지 않으며 만일 $(i, j) \in E$ 라면 $(j, i) \in E$ 이다.

S : 연결을 요구하는 노드쌍의 수

W : 이용가능한 파장의 개수

s_k : k 번째 노드쌍의 근원지노드 ($k=1, \dots, S$)

d_k : k 번째 노드쌍의 목적지노드 ($k=1, \dots, S$)

t_k : k 번째 노드쌍의 연결수요 ($k=1, \dots, S$)

r_k : 결정변수로 k 번째 노드쌍의 연결수 ($k=1, \dots, S$)

f_{kl} : k 번째 노드쌍이 파장 l 로 연결된 연결수 ($k=1, \dots, S, l=1, \dots, W$)

x_{ijl}^k, x_{jil}^k 결정변수로 k 번째 노드쌍을 위해 링크 $(i, j) \in E$ 에 (또는 반대 방향으로) 파장 l 로 연결경로에 할당되면 1, 그렇지 않으면 0.

기호 및 표현에서 회선망과 비교했을 때 가장 큰 차이점은 결정변수 x_{ijl}^k 일 것이다. 회선망에서는 결정변수를 x_{ij}^k 로 하였으나 WDM 광전달망에서는 파장과 관련된 첨자가 추가되었다. 이렇게 파장관련 첨자가 추가된 것은 연결경로가 어느 파장에 의한 것인가가 여기서는 중요하기 때문이다. 이렇게 함으로써 전 절에서 설명한 파장연속성의 제약과 파장충돌과 관련된 제약식을 최적화 모형에서 표현할 수 있게 된다. WDM 광전달망에서의 공정성을 갖는 경로설계 및 파장할당 최적화 모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 (P1) \quad & \text{S - Maximize} \quad \text{sortmin} \left[\frac{r_1}{t_1}, \frac{r_2}{t_2}, \dots, \frac{r_S}{t_S} \right] \\
 & \text{Subject to} \quad \sum_{k=1}^S (x_{ijl}^k + x_{jil}^k) \leq 1, \quad (i, j) \in E, \quad l = 1, \dots, W \\
 & \quad \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ijl}^k - \sum_{j:(i,j) \in E} x_{jil}^k = \begin{cases} f_{kl}, & i = s_k \\ -f_{kl}, & i = d_k \\ 0, & i \neq s_k \ \& \ i \neq d_k \end{cases} \\
 & \quad \quad \quad k = 1, \dots, S, \quad l = 1, \dots, W \\
 & \quad \quad \quad r_k = \sum_{l=1}^W f_{kl}, \quad k = 1, \dots, S \\
 & \quad \quad \quad x_{ijl}^k, x_{jil}^k; 0 \text{ or } 1, \quad (i, j) \in E, \quad k = 1, \dots, S, \quad l = 1, \dots, W \\
 & \quad \quad \quad f_{kl} \geq 0, r_k \geq 0: \text{integer}, \quad k = 1, \dots, S, \quad l = 1, \dots, W
 \end{aligned}$$

모형 (P1)의 목적식은 노드쌍별 공정한 광 경로 설계를 표현한 것으로 대괄호 안의 최소값을 최대화하고, 그 조건하에서 대괄호 안의 두 번째 최소값을 최대화하고, 추가된 조건하에서 대괄호 안의 세 번째 최소값을 최대화하는 순서로 연속적인 최적화 과정을 진행시키는 것을 표현한 것으로 참고문헌[1,2]에서는 이와 같은 문제를 연속적인 최대-최소 연결비율 문제 (successive max-min connection ratio problem)라고 정의한 바 있다. 첫 번째 제약식은 파장 충돌을 회피하기 위한 제약식이고, 두 번째 제약식은 k번째 노드쌍간 파장 l로 연결된 연결량 f_{kl} 만큼의 연결경로가 존재하게 해주는 제약식이다. 연결경로를 파장별로 표현함으로써 연결 경로간 파장변환을 허용하지 않는 파장연속성의 제약을 표현할 수 있다. 각 노드쌍별 연결수의 합은 각 파장별로 연결된 연결수들을 합하면 된다. 이것을 표현한 것이 세 번째 제약식이다. 이러한 최적화 모형 (P1)는 NP-hard 문제이다.

(P1)의 최적 목적함수 값이 1보다 큰가? 라는 문제는 NP-complete 하다.

(증명) 참고문헌[6]에서 SLE(Static Lightpath Establishment) 문제는 graph-(vertex)-coloring 문제와 동등하기 때문에 NP-complete하다는 것을 증명하였다. 따라서 우리는 위의 문제가 SLE 문제와 동등하다는 것만 보이면 된다. SLE 문제란 주어진 네트워크 및 파장수로 노드간 연결수요를 만족하게 하는 광경로 및 파장할당이 가능한가? 하는 문제이다. 먼저 SLE의 해가 '예'이면 문제 (P1)의 최적 목적함수 값이 1보다 큰 것은 자명하다. 역으로 문제의 최적 목적함수 값이 1보다 큰 해는 바 (P1)로 SLE의 가능해가 된다. (증명끝)

연속적인 최적화 모형 (P1)의 첫 번째 최적화 과정에 해당되는 문제는 최적화 모형 (P1)의 이론적 한계를 제공하기 때문에 특별한 의미를 갖는다. 이를 위해서 수요대비 최소 연결비율을 ρ라고 하면

[정리 1] 파장수가 W (W ≥ 3)인 문제

$$\rho = \min \left\{ \frac{r_1}{t_1}, \frac{r_2}{t_2}, \dots, \frac{r_S}{t_S} \right\} \quad (3.1)$$

이 되기 때문에 첫 번째 최적화 과정에 해당되는 문제는 최소 연결비율 최대화 문제로서 다음의 (P2)와 같은 최적화 모형이 된다:

$$(P2) \left\{ \begin{array}{l} \text{Maximize} \quad \rho \\ \text{Subject to} \quad r_k - t_k \rho \geq 0, \quad k = 1, \dots, S \\ \\ \sum_{l=1}^S (x_{ijl}^k + x_{jil}^k) \leq 1, \quad (i, j) \in E, \quad l = 1, \dots, W \\ \\ \sum_{i:(i,j) \in E} x_{ijl}^k - \sum_{j:(i,j) \in E} x_{jil}^k = \begin{cases} f_{kl}, & i = s_k \\ -f_{kl}, & i = d_k \\ 0, & i \neq s_k \text{ \& } i \neq d_k \end{cases} \\ \\ k = 1, \dots, S, \quad l = 1, \dots, W \\ \\ r_k = \sum_{l=1}^W f_{kl}, \quad k = 1, \dots, S \\ \\ x_{ijl}^k, x_{jil}^k; 0 \text{ or } 1, \quad (i, j) \in E, \quad k = 1, \dots, S, \quad l = 1, \dots, W \\ \\ f_{kl} \geq 0, r_k \geq 0: \text{integer}, \quad k = 1, \dots, S, \quad l = 1, \dots, W, \quad \rho \geq 0 \end{array} \right.$$

최적화 모형 (P2)의 첫 번째 제약식은 식 (3.1)을 반영한 선형제약식이며, 정리1로 부터 모형 (P2) 또한 NP-hard 문제가 된다.

4. 발견적 해법 및 적용

본 절에서는 NP-hard 문제인 최적화 모형 (P1)의 발견적 해법을 제시하고, 이 알고리즘의 수치적용 예를 보이며, 실제적인 네트워크에 적용하여 알고리즘의 효율성을 검증한다.

4.1 발견적 해법

WDM 광전달망에서 공정성을 갖는 경로설계 및 파장할당의 발견적 알고리즘은 참고문헌[1]의 회선망에서의 공정성을 갖는 발견적 알고리즘과 매우 비슷하나 파장을 이용한 연결경로 설정이 회선망의 알고리즘과 다른 점이다. 알고리

즘은 순증가 과정, 작은 재경로 과정 및 큰 재경로 과정으로 이루어진다. 알고리즘에서 노드쌍간 증가경로는 파장충돌을 일으키지 않는 경로이어야 한다. 따라서 본 알고리즘에서는 한 번의 순증가 과정을 통해 하나의 노드쌍에 하나의 연결만을 증가시킬 수 있다. 또한 증가경로를 찾더라도 할당할 파장을 찾지 못해 연결을 못할 수 있다. 이러한 점들이 [1]의 알고리즘과 다른 점이다.

WDM 광전달망에서 공정성을 갖는 경로설계 및 파장할당의 발견적 알고리즘은 다음과 같다. WDM 광전달망에서 공정성을 갖는 경로설계 및 파장할당 발견적 알고리즘

[단계 0] 초기화(initialization) 과정

- (0-1) 초기 경로해 $x_{ij}^k(\forall k, \forall ij, \forall l)$ 및 모든 노드쌍의 연결비율을 0으로 초기화한다.
- (0-2) 주어진 네트워크를 잔여 네트워크로 놓는다.
- (0-3) 큰 재경로 과정 상태를 비활성 ($Big = 0$)으로 놓는다.
- (0-4) 노드쌍에 대해 우선순위를 결정한다.
- (0-5) 우선순위에서 가장 앞에 있는 노드쌍을 선택한다.

[단계 1] 순증가(pure augmenting) 과정

- (1-1) 선택된 노드쌍의 연결비율을 R 이라고 놓는다. $R \geq 1.0$ 이면 멈춘다. 현재의 경로해 $x_{ij}^k(\forall k, \forall ij, \forall l)$ 를 최적 근사해로 취한다.
- (1-2) $R < 1.0$ 이면 선택된 노드쌍을 연결하는 증가경로를 발견하고 할당할 파장을 선택한다. 증가경로가 없거나 증가경로가 있어도 할당할 파장이 없다면 다음 우선순위 노드쌍의 증가경로를 발견하고 할당할 파장을 선택한다. 마지막 우선순위 노드쌍까지 증가경로가 발견되지 않거나 할당할 파장이 없다면 단계 2로 간다.
- (1-3) 발견된 증가경로에 대해 선택한 파장을 할당한다.
- (1-4) 노드쌍의 연결비율을 갱신하고 노드쌍의 우선순위를 연결비율의 오름차순으로 재정렬한다.
- (1-5) 경로해 $x_{ij}^k(\forall k, \forall ij, \forall l)$ 및 잔여 네트워크를 갱신한다.
- (1-6) 우선순위에서 가장 앞에 있는 노드쌍을 선택한 뒤 단계 1을 반복한다.

[단계 2] 작은 재경로(small rerouting) 과정

- (2-1) 최소 비율 노드쌍을 제외한 모든 노드쌍에 대해 연결비율이 $R + \alpha$ 이상은 유지하면서 취소할 수 있는 연결량을 모두 취소시킨다.
- (2-2) 잔여 네트워크를 갱신하고 최소 비율 노드쌍을 연결하는 증가경로를 발견하고 할당할 파장을 선택한다. 증가경로가 없거나 할당할 파장이 없다면 단계 3으로 간다.
- (2-3) 증가경로에 선택한 파장을 할당한다.
- (2-4) 노드쌍의 연결비율을 갱신하고 노드쌍의 우선순위를 연결비율의 오름차순으로 재정렬한다.
- (2-5) 경로해 $x_{ij}^k(\forall k, \forall ij, \forall l)$ 및 잔여 네트워크를 갱신한다.
- (2-6) 우선순위에서 가장 앞에 있는 노드쌍을 선택한 뒤 단계 1로 간다.

[단계 3] 큰 재경로(big rerouting) 과정

- (3-1) 큰 재경로과정 상태가 활성화 ($Big = 1$) 이면 과정전의 최소 연결비율 R_o 과 과정후의 최소 연결비율 R 을 비교한다:
 - $R < R_o + \beta$ 이면 멈추며 과정전의 경로해 $y_{ij}^k(\forall k, \forall ij, \forall l)$ 를 최적 근사해로 취한다.
 - $R \geq R_o + \beta$ 이면 $Big = 0$ 으로 놓는다.
- (3-2) 큰 재경로과정 상태가 비활성 ($Big = 0$) 이면 $y_{ij}^k = x_{ij}^k(\forall k, \forall ij, \forall l)$ 및 $R_o = R$ 로 놓는다. 큰재경로 상태를 활성화 ($Big = 1$)으로 놓는다.
- (3-3) 최소 비율 노드 $R\gamma$ 쌍을 제외한 모든 노드쌍에 대해 연결비율이 까지 연결량을 취소시킨다.

- (3-4) 잔여 네트워크를 갱신하고 최소 비율 노드쌍을 연결하는 증가경로를 발견한다. 증가경로가 없거나 증가경로에 할당할 파장이 없으면 멈추며 경로해를 $y_{ij}^k(\forall k, \forall ij, \forall l)$ 최적 근사해로 취한다.
- (3-5) 증가경로에 선택한 파장을 할당한다.
- (3-6) 노드쌍의 연결비율을 갱신하고 노드쌍의 우선순위를 연결비율의 오름차순으로 재정렬한다.
- (3-7) 경로해 $x_{ij}^k(\forall k, \forall ij, \forall l)$ 및 잔여 네트워크를 갱신한다.
- (3-8) 우선순위에서 가장 앞에 있는 노드쌍을 선택한 뒤 단계 1로 간다.

참고문헌[1]에서와 같이 발견적 알고리즘의 재경로 과정의 취소수준을 결정하는 파라미터 α, β, γ 는 알고리즘의 반복(iteration)수에 영향을 준다. 이제

$$D = \max \{t_1, t_2, \dots, t_S\} \quad (4.1)$$

$$0 < \alpha \leq \delta = \min \left\{ \frac{1}{D}, \min \left\{ \frac{1}{t_i} - \frac{1}{t_j} \mid t_i \neq t_j, i, j = 1, \dots, S \right\} \right\} \quad (4.2)$$

라고 하면 알고리즘의 총반복수는 다음과 같다. [정리 2] 발견적 알고리즘의 총 반복수는 $0 < \alpha \leq \delta$ 일 때 $O\left(\frac{SD(1-\gamma+2\beta)}{2\beta}\right)$ 이다. 특히 α, β 의 범위가 모두 $0 < \alpha, \beta \leq \delta$ 일 때 총반복수는 $O\left(\frac{SD(1-\gamma+2\delta)}{2\delta}\right)$ 이 된다.

(증명) 제시된 발견적 알고리즘은 [1]의 알고리즘과 반복수 계산에 동일한 분석이 가능하기 때문에 [1]의 정리3의 증명과 같다. (증명끝)

본 발견적 알고리즘의 구현과 관련하여 잔여

네트워크, 파장할당 방법 및 재경로 과정에서의 취소방법은 중요한 의미를 갖는다. 이에 대해서 기술하면 다음과 같다.

잔여네트워크: 이용 가능한 파장들 중에서 링크에 할당된 파장들을 제외한 파장들을 그 링크의 자유파장(free wavelength)이라고 한다. 초기 네트워크에서의 모든 링크의 자유파장은 이용 가능한 모든 파장이 되며, 잔여 네트워크는 이러한 자유파장들을 갖는 링크로 구성된다.

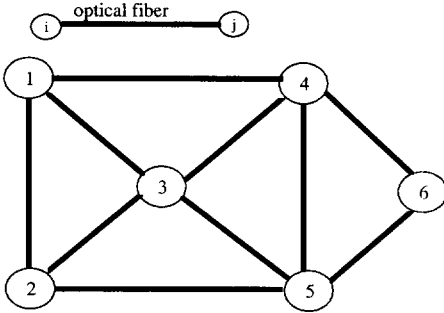
파장할당 방법: 하나의 경로에 하나의 파장을 할당하기 위해서는 그 경로를 이루는 링크들의 자유파장들간에 동일한 파장이 최소 한 개 이상 있어야 한다. 할당 가능한 파장이 한 개만 존재하면 그 파장을 할당하고, 만약 복수개가 존재하면 그 중 각 파장에 부여한 인덱스(index)가 가장 작은 파장을 할당하는 것으로 한다. 이러한 파장할당 전략을 first-fit 전략이라 하며 할당 가능한 파장중 랜덤하게 임의의 파장을 할당하는 것보다 파장의 재사용(reuse)면에서 우수한 것으로 알려져있다.[4]

재경로 과정에서의 취소방법: 재경로 과정에서의 취소 방법은 증가경로 결정방법 및 파장할당 방법의 반대 개념을 이용한다. 즉, 어떤 노드쌍의 연결을 취소할 때는 지금까지 연결된 경로중 최장경로(longest path)가 우선적으로 취소되고, 최장경로가 복수개가 존재할 때는 할당된 파장 인덱스가 가장 큰 경로가 우선적으로 취소된다. 가장 큰 파장 인덱스를 갖는 최장경로가 복수개가 존재하면 이 때는 임의로 선정한다.

4.2 알고리즘의 수치적용 예

수치적용 예를 통해 제시한 발견적 알고리즘의 수행과정을 보인다. 예제 네트워크, 노드쌍 및 연결요구수, 이용 가능 파장이 [그림 5-1]에

이용 가능한 파장수 : 5 개 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5$)



연결요구 노드쌍	연결요구수
(1, 5)	6
(2, 4)	8
(3, 6)	12

[그림 4-1] 수치적용을 위한 네트워크, 노드쌍 및 연결요구수, 이용가능 파장

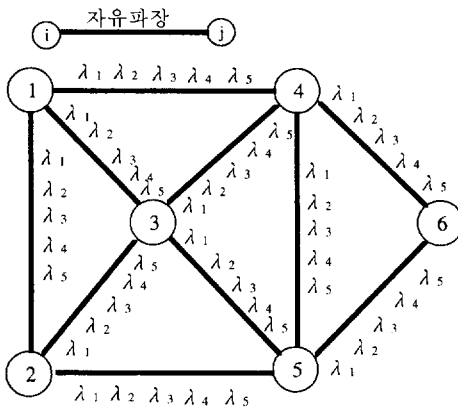
나타나 있다. 알고리즘 수행과 관련된 파라미터는 $\alpha = \beta = 0.0001$, $\gamma = 0.5$ 로 놓았다.

(단계 0) 초기화 과정

- 모든 노드쌍의 연결비율을 0으로 함.
- 잔여네트워크의 모든 링크의 자유파장을 모든 이용파장으로 놓음. [그림 4-2]
- 노드쌍에 대한 우선순위는 (1,5), (2,4), (3,6) 순.
- 초기 경로해 $x_{ij}^k = 0$, for $k=1, 2, 3$, $l=1, 2, 3, 4, 5$, $(i, j) \in E$
- 큰 제경로 과정 상태를 비활성화로 함. 즉, Big = 0.

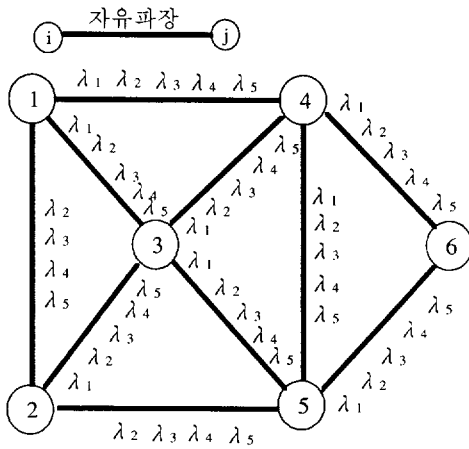
(단계 1) 순증가 과정

- 우선순위에서 가장 앞에 위치한 노드쌍 (1,5)를 선택한 후 증가경로로 최단경로 1-2-5를 찾고 파장 λ_1 을 할당한다. 경로해, 노드쌍의 우선순위, 잔여 네트워크, 노드쌍의 연결비율 등을 갱 신하면 [그림 4-3]과 같다.
- $x_{121}^1 = x_{251}^1 = 1$, 나머지는 0.
- 노드쌍의 우선순위: (2,4), (3,6), (1,5)
- 우선순위에서 가장 앞에 위치한 노드쌍 (2,4)을 선택한 후 2-3-4를 증가경로로 결



연결요구 노드쌍	연결비율
(1, 5)	0
(2, 4)	0
(3, 6)	0

[그림 4-2] 초기화 과정의 잔여네트워크 및 연결비율



연결요구 노드쌍	연결 요구수	연결수	연결 비율
(1, 5)	6	1	0.17
(2, 4)	8	0	0
(3, 6)	12	0	0

[그림 4-3] 순증가 과정 1회 실시 후의 잔여 네트워크 및 노드쌍별 연결비율

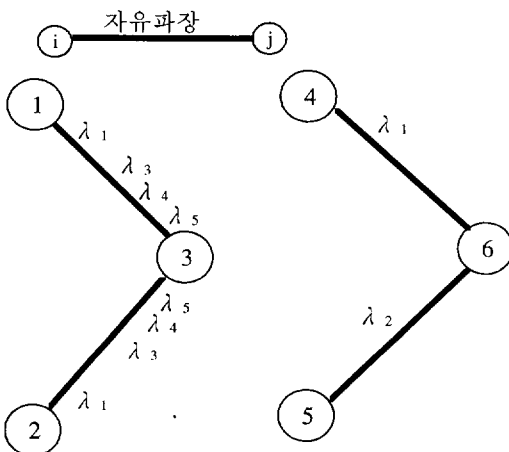
정한다. 파장 λ_1 을 할당한다. 그리고 경로해, 잔여 네트워크, 노드쌍의 연결비율, 노드쌍의 우선순위 등을 갱신한다.

· [그림 4-4]는 이와 같은 단계 1 과정을 21회 반복 시행한 후의 잔여 네트워크, 노드쌍의 연결비율, 노드쌍의 우선순위, 노드쌍별 연결경로 및 할당파장 등을 보여주고 있다.

- 노드쌍 우선순위: (3,6), (1,5), (2,4)
- [그림 4-4]에서 보듯이 세 노드쌍에 대해 더 이상 증가경로를 발견할 수 없다. 그리고 최소연결비율이 0.67로서 1.0보다 작으므로 단계 2의 작은 재경로 과정으로 넘어간다.

(단계 2) 작은 재경로과정

- 노드쌍 (3,6)의 연결비율이 최소이므로 노드



연결요구 노드쌍	연결 요구수	연결수	연결 비율
(1, 5)	6	5	0.83
(2, 4)	8	7	0.88
(3, 6)	12	8	0.67

[그림 4-4] 작은 재경로 과정 직전의 잔여 네트워크 및 노드쌍별 연결비율

〈표 4-1〉 작은 재경로 과정 직전의 노드쌍별 연결경로 및 할당파장

연결요구 노드쌍	광경로(Lightpath)	
	연결경로	할당파장
(1, 5)	1 - 2 - 5	λ_1
	1 - 4 - 5	λ_1
	1 - 3 - 5	λ_2
	1 - 2 - 5	λ_4
	1 - 4 - 5	λ_4
(2, 4)	2 - 3 - 4	λ_1
	2 - 1 - 4	λ_2
	2 - 5 - 4	λ_2
	2 - 1 - 4	λ_3
	2 - 5 - 4	λ_3
	2 - 1 - 4	λ_5
	2 - 5 - 4	λ_5
(3, 6)	3 - 5 - 6	λ_1
	3 - 4 - 6	λ_2
	3 - 4 - 6	λ_3
	3 - 5 - 6	λ_3
	3 - 4 - 6	λ_4
	3 - 5 - 6	λ_4
	3 - 4 - 6	λ_5
	3 - 5 - 6	λ_5

쌍 (3,6)을 제외한 나머지 두 노드쌍에 대해 최소 연결비율 0.67과 $\alpha (= 0.0001)$ 를 합한 0.67001 이상의 연결비율을 유지하면서 취소방법에 따라 취소할 수 있는 연결량을 모두 취소시킨다. 취소한 내용과 취소후의 잔여 네트워크, 연결비율은 [그림 4-5]와 같다.

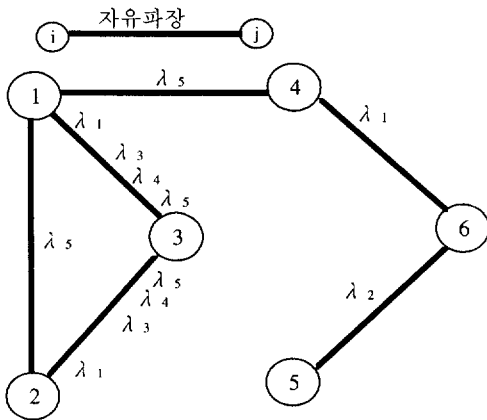
· 최소 연결비율을 갖는 노드쌍 (3,6)에 대해 최단경로로 3-1-4-6 하나를 발견했지만 이 경로로 할당할 파장이 없다. 따라서 단계3의 큰 재경로 과정으로 들어간다.

(단계 3) 큰 재경로과정

· 큰 재경로 과정 상태가 비활성(Big = 0)이므

〈표 4-2〉 작은 재경로 과정에서의 취소 내용

근원지-목적지 노드쌍	취소경로 및 취소파장
(2, 4)	2 - 1 - 4 λ_5



연결요구 노드쌍	연결 요구수	연결수	연결 비율
(1, 5)	6	5	0.83
(2, 4)	8	6	0.75
(3, 6)	12	8	0.67

[그림 4-5] 작은 재경로 과정에서 취소 이후의 잔여 네트워크 및 노드쌍별 연결비율

로 $R_0 = R (= 0.67)$, 로 $y_{ij}^k = x_{ij}^k (\forall k, \forall ij, \forall l)$ 놓고, 큰 재경로 과정 상태를 활성 (Big=1)으로 한다.

· 노드쌍 (3,6)의 연결비율이 최소이므로 노드쌍 (3,6)을 제외한 나머지 두 노드쌍에 대해 최소연결비율 0.67과 $\gamma (= 0.5)$ 를 곱한 0.335이상의 연결비율을 유지하면서 취소할 수 있는 연결량을 모두 취소시킨다. 취소한 내용과 취소후의 잔여 네트워크, 연결비율은 <표 4-3> 및 [그림 4-6]과 같다.

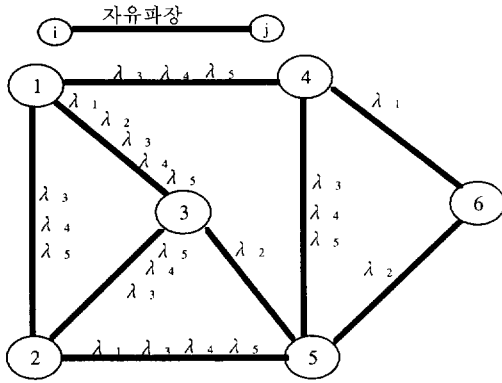
· 큰 재경로 과정으로 들어오기 전의 최소 연결비율을 갖는 노드쌍 (3,6)에 대해 최단경로

3-5-6을 찾고 파장 λ_2 을 할당한다. 경로해, 잔여 네트워크, 노드쌍의 연결비율, 노드쌍의 우선순위 등을 갱신한다. 그리고, 단계 1로 돌아간다.

단계1의 순증가 과정을 9회 반복 시행하고 나면 최소연결 비율이 0.75인 상태에서 단계2 과정을 맞는다. 앞에서와 같이 단계 2의 작은 재경로 과정에서 취소과정을 하였음에도 불구하고 최소 연결 비율 노드쌍을 갖는 노드쌍간에 증가경로를 찾지 못하여 단계3의 큰 재경로 과정으로 들어간다. 이번에는 큰 재경로 과정이 활성상태 (Big =1)이므로 현재의 최소 연결비율 $R (=$

<표 4-3 > 큰 재경로 과정에서의 취소 내용

근원지-목적지 노드쌍	취소경로 및 파장
(1, 5)	1 - 2 - 5 λ_4
	1 - 4 - 5 λ_4
	1 - 3 - 5 λ_2
(2, 4)	2 - 5 - 4 λ_5
	2 - 1 - 4 λ_3
	2 - 5 - 4 λ_3



연결요구 노드쌍	연결 요구수	연결수	연결 비율
(1, 5)	6	2	0.33
(2, 4)	8	3	0.38
(3, 6)	12	8	0.67

[그림 4-6] 큰 재경로 과정에서의 취소 이후의 잔여 네트워크 및 노드쌍별 연결비율

0.73)과 이전의 최소 연결비율 $R_0 (= 0.67)$ 와 $\beta (= 0.0001)$ 를 합한 값과 비교하게 된다.

$R \geq R_0 + \beta$ 이므로 $R_0 = 0.75$, $y_{ij}^k = x_{ij}^k$ ($\forall k, \forall ij, \forall l$) 로 놓고 취소과정을 시행한다. 경로해와 최소 연결비율, 잔여네트워크를 갱신한 후 최소 연결비율을 갖는 노드쌍간 증가경로를 발견하여 연결한다. 갱신과정후 단계1로 돌아간다.

단계1의 순증가과정과 작은 재경로 과정을 거쳐 큰 재경로 과정으로 들어오게 되는데 이 때 최소 $R_0 = 0.75$ 연결비율이 0.75이므로 이전의 최소연결 비율 에 비교해 β 이상 증가하지 않았으므로 알고리즘은 멈추며 y_{ij}^k 를 최적 근사해로 취하고, 최소 연결비율의 최대값은 0.75가 된다. 최종 결과를 정리하면 <표 4-4> 및 [그림 4-7]과 같다.

4.3 발견적 알고리즘의 적용 및 결과

여기서는 본 논문에서 제시한 발견적 알고리즘으로 얻은 최소 연결비율의 최대값이 실제 크기의 네트워크에 적용하였을 때 최적값과 어느 정도 차이가 있는지 비교한다. 이를 비교하기 위

해 최적화 모형 (P2)로 얻은 최소 연결 비율의 최대값과 알고리즘의 결과와 비교한다. 최적화 모형 (P2)는 혼합 정수계획문제로서 상용 코드인 GAMS/OSL[5]을 워크스테이션 HP7000/600S에 적용하였다. GAMS는 대규모의 복잡한 수리계획문제를 쉽게 모델링하여 적용할 수 있게 World Bank에서 개발한 언어이고 OSL은 IBM에서 개발한 혼합 정수계획문제의 solver이다.

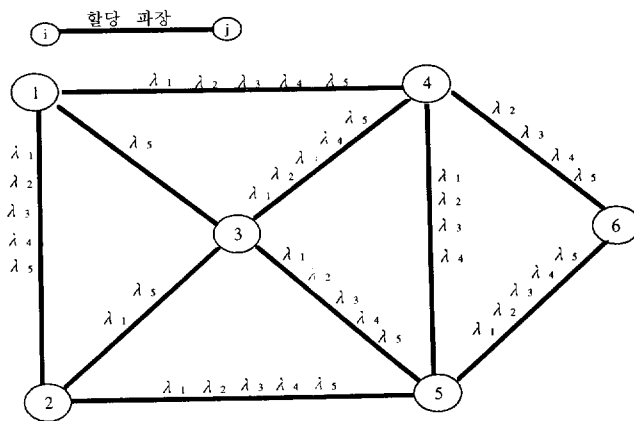
실험을 위한 네트워크는 [그림 4-8]의 $3 \times n$ Grid 네트워크, [그림 4-9]의 NSF 네트워크 및 [그림 4-10]의 European Optical Network (EON)이다. $3 \times n$ Grid 네트워크, NSF 네트워크, EON의 기본 체원은 <표 4-5>와 같다.

발견적 알고리즘과 최적화 모형 (P2)의 결과를 비교한 실험은 총 10회 실시하였으며, 실험 내용과 결과는 <표 4-6>와 <표 4-7>에 각각 나타나 있다.

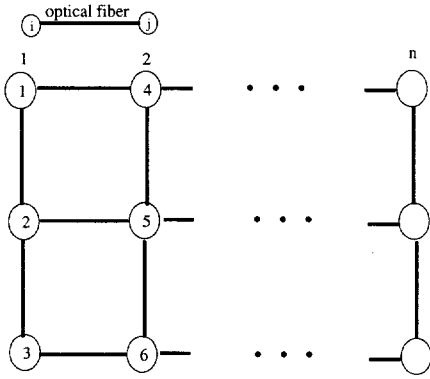
<표 4-7>에 의하면 발견적 알고리즘이 모든 문제에 대해서 GAMS/OSL와 같거나 더 좋은 결과를 제공하였다. 특히 대규모 크기의 문제에 해당되는 실험-10, 실험-11, 실험-12에 대해서는 GAMS/OSL은 메모리 문제로 해를 제공하지 못하였으나 발견적 알고리즘은 어려움 없이 해를 제공해주고 있다. 또한 실험-2, 실험-3 및 실험

<표 4-4> 발견적 알고리즘을 적용한 예제 문제의 결과

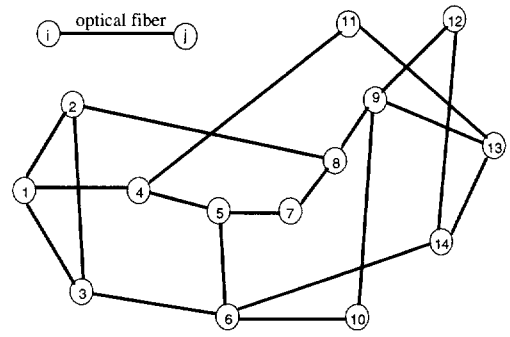
연결요구 노드쌍	연결 수요	연결수	연결 비율	연결 경로	할당파장
(1, 5)	6	5	0.83	1 - 2 - 5	λ_1
				1 - 4 - 5	λ_1
				1 - 2 - 5	λ_3
				1 - 4 - 5	λ_3
				1 - 3 - 2 - 5	λ_5
(2, 4)	8	6	0.75	2 - 3 - 4	λ_1
				2 - 1 - 4	λ_2
				2 - 5 - 4	λ_2
				2 - 1 - 4	λ_4
				2 - 5 - 4	λ_4
(3, 6)	12	9	0.75	3 - 5 - 6	λ_1
				3 - 4 - 6	λ_2
				3 - 5 - 6	λ_2
				3 - 4 - 6	λ_3
				3 - 5 - 6	λ_3
				3 - 4 - 6	λ_4
				3 - 5 - 6	λ_4
				3 - 4 - 6	λ_5
합	26	20	0.77		



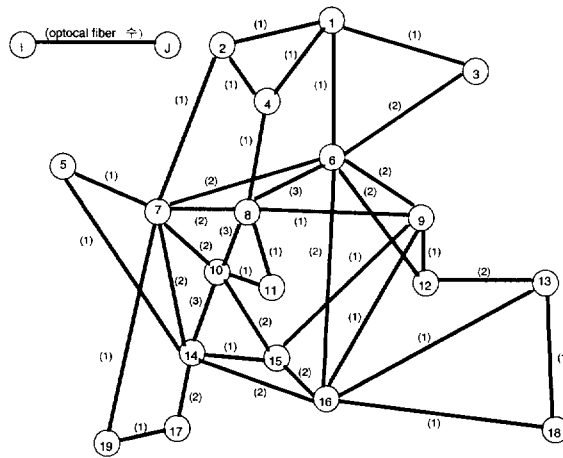
[그림 4-7] 발견적 알고리즘을 적용한 예제 문제의 결과



[그림 4-8] 3×n Grid 네트워크



[그림 4-9] NSF네트워크 토폴로지



[그림 4-10] EON 토폴로지

구분	노드 수	링크 수
3×n Grid 네트워크	3×n	2+5×(n-1)
NSF network	14	20
EON	19	37

<표 4-5> 실험 적용 네트워크의 기본 제원

〈표 4-6〉 발견적 알고리즘과 최적화 모형의 최소 연결비율 최대값 비교를 위한 실험 내용

구 분	네트워크	연결요구 노드쌍 수	사용 파장 수	연결수요 범위	정수형 결정변수의 수
실험-1	3×3 grid	8	3	2 ~ 5	576
실험-2	3×4 grid	5	3	3 ~ 5	510
실험-3	3×5 grid	4	3	5 ~ 8	528
실험-4	3×6 grid	3	3	8 ~ 10	486
실험-5	NSF	3	5	11 ~ 13	600
실험-6	NSF	3	5	6 ~ 10	600
실험-7	NSF	3	5	9 ~ 9	600
실험-8	NSF	3	5	5 ~ 10	600
실험-9	NSF	3	5	10 ~ 10	600
실험-10	EON	3	5	6 ~ 10	1110
실험-11	NSF	91 (모든 노드쌍)	20	2 ~ 5	72,800
실험-12	EON	171 (모든 노드쌍)	20	2 ~ 5	253,080

〈표 4-7〉 발견적 알고리즘과 GAMS/OSL의 결과 비교

구 분	GAMS/OSL로 얻은 최적화 모형 (P2)의 해	발견적 알고리즘 으로 얻은 최소 연결비율의 최대값	발견적 알고리즘 반복수	
			작은 재경로 과정 반복수	큰 재경로 과정 반복수
실험-1	0.200	0.200	1	1
실험-2	0.200*	0.250	3	1
실험-3	0.400*	0.500	3	2
실험-4	0.222*	0.300	3	1
실험-5	0.539	0.539	4	1
실험-6	0.800	0.800	3	1
실험-7	0.556	0.556	1	1
실험-8	0.600	0.600	2	1
실험-9	0.600	0.600	2	1
실험-10	**	0.429	6	2
실험-11	**	0.33	3	1
실험-12	**	0.33	6	1

* 발견적 알고리즘 제공값보다 더 작은값임

** GAMS/OSL가 해를 제공하지 못함

-4에서 발견적 알고리즘이 GAMS/OSL보다 더 좋은 결과를 제공할 수 있는 것은 GAMS/OSL이 RAM 메모리 한계 내에서 최적해를 계산하기 때문에 최적해가 아닌 근사해를 제공하고 멈추었기 때문이다.

5. 결 론

WDM 방식은 노드에서의 전/광 변환에 따른 전송 지연 없이 여러 개의 서로 다른 파장을 동시에 이용하여 신호를 전송함으로써 Tera bits/s의 초고속 전송의 실현을 가능하게 할 것으로 기대된다. 그러나 광섬유의 물리적 특성과 관련 응용소자의 기술적 제약으로 이용 가능한 파장의 수는 제한되므로 파장은 망의 주요 자원이 된다. 또한 경로를 설정하고 파장을 할당하는데 있어 여러 가지 제약들이 나타난다. 이러한 제약들로 인해 요구되는 노드쌍간의 연결 경로를 어떻게 설정하고, 각 연결에 어떠한 파장을 할당하느냐에 따라 자원인 파장 사용의 효율성과 노드쌍간 연결 공정성이 결정된다.

본 연구는 노드쌍간의 수요가 고정되고 노드쌍간의 연결은 하나의 광경로로만 이루어지는 단일홉 WDM 광전달망을 대상으로 하였으며 파장변환을 허용치 않았다. 이러한 가정 하에서 WDM 광전달망에서의 공정하고 효율적인 경로 제어를 위한 알고리즘을 제시하였다. 즉, 물리적 망 토폴로지가 주어지고, 이용 가능한 파장수 및 근원지-목적지 노드쌍간의 연결수요가 주어졌을 때, 근원지-목적지 노드쌍간의 연결 공정성을 보장하면서 연결 수요를 최대로 만족시킬 수 있는 경로설계 및 파장할당 방법을 제시하였다. 노드쌍간의 연결에 대한 공정성과 최대성을 동시에

만족하는 평가 척도로 각 노드쌍간의 수요대비 연결비율의 적은 값 순서로 최대화하는 경로제어 최적화 문제를 제시하였으며, 이러한 문제에 대해 다항식 반복수만에 근사해를 제공해주는 발견적 알고리즘을 개발하였다. 개발한 알고리즘의 적용결과를 GAMS/OSL의 값과 비교하였으며 발견적 알고리즘이 최적해에 매우 근사한 해를 제공함을 보였다.

만일 노드에서 파장변환을 허용하게 되면 경로설정에 융통성이 증가되어 파장변환을 허용하지 않는 WDM 광전달망에서의 연구 결과에 대한 이론적 한계치를 제공하는 연구가 된다. 또한 일부 노드에 대해서만 파장변환을 허용하면 망의 확장성과 망운영이 용이하여져 추후 WDM 광전달망의 망구조와 연관지어 중요하게 고려될 수 있으며 이에 대해서는 추후 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] 박구현, 우재현, "연속적인 최대-최소 연결 비율 문제: 회선망에서 공정성과 효율성을 보장하는 경로설정", 한국경영과학회, 제22권 2호, 1997. 6.
- [2] 박구현, 우재현, "연속적인 최대-최소 연결 비율 문제의 발견적 알고리즘 구현 및 수치적용", '97 춘계공동학술대회 논문집, 한국경영과학회 및 대한산업공학회, 1997.
- [3] 이종원, 박구현, 이창희, "광전달망에서 최소 파장 수의 한계값을 구하는 실질적인 방법", 추계종합학술발표회 논문집, 제15권 2호, 한국통신학회, 1996. 11.
- [4] Briman, A. and Kershenbaum, A., "Routing and Wavelength Assignment Methods in

- Single-Hop All-Optical Networks with Blocking”, IEEE INFOCOM '95., 1995.
- [5] Brooke, A., Kendrick, D. and Meerraus, A., GAMS: A User's Guide, Release 2.25, boyd and fraster, The Scientific Press Series, 1992.
- [6] Chlamtac, I., Ganz, A., and Karmi, G., "Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WAN's", IEEE Transactions on Communication, Vol. 40, No. 7, 1992.
- [7] Green, P.E. JR., Fiber Optic Networks, Prentice-Hall, 1993.
- [8] Medova, E.A., "Network Flow Algorithms for Routing in Networks with Wavelength Division Multiplexing", IEE Proc.-Commun., Vol. 142, No.4, 1995.
- [9] Ramaswami, R. and Sivarajan, K. N., "Optimal Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks", IEEE INFOCOM'94, 1994.
- [10] Wauters, N., and Demeester, P., "Design of the Optical Path Layer in Multi-wavelength Cross-Connected Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 14, No. 5, 1996.