

완전 광전달망에 적합한 망 구조와 파장 할당 알고리즘 연구

정희원 강 안 구*, 최 한 규*, 양 근 수**, 조 규 섭**, 박 창 수***

Study on the Network Architecture and the Wavelength Assignment Algorithm for All-Optical Transport Network

An-Goo Kang* Han-Kyoo Choi* Keun-Soo Yang** Kyu-Seob Cho** Chang-Soo Park***
Regular Member

요 약

본 논문은 완전 광전달망에 적합한 네트워크 구조를 얻기 위해 몇 가지 구조들의 파장 수와 LT 수를 비교한다. 이 구조들은 PPWDM, SHWDM, DHWDM, 완전 광 WDM이며, 사용되는 토폴로지는 라우팅 패턴이 일정하고 트래픽 패턴이 균일한 정적 링 네트워크이다. 또한, 본 논문은 완전 메쉬 형태의 트래픽 패턴을 갖는 완전 광 WDM 링 구조에서 파장 할당 알고리즘을 제안한다. 파장 할당 알고리즘은 상위 계층과 관계없이 광 계층에서 직접 설정되는 트래픽을 최단의 경로를 따라 할당하는 학습적 알고리즘에 기초한다.

ABSTRACT

This paper compares some architectures to achieve the optimized WDM architecture for all optical transport network, the comparison is presented in terms of the number of required wavelength and LT. These architecture types are PPWDM, SHWDM, DHWDM and fully optical WDM. Topology is a static ring network where the routing pattern is fixed and traffic pattern has uniform demand. This paper also proposes an algorithm for the wavelength assignment for a fully optical WDM ring network which has full mesh traffic pattern. The algorithm is based on heuristic algorithm which assigns traffic connections according to their respective shortest path. Traffic described here that is to be passed through can be routed directly within the optical layer instead of having the higher layer to handle it.

I. 서론

광 소자 기술과 광 전송 기술은 단 기간의 짧은 역사에도 불구하고 급속한 발전과 기술혁신을 이루고 있으며, 그 결과 현재는 가장 경제적이고 효율적으로 초고속 정보통신망을 구축할 수 있는 핵심 기술로 부각되고 있다. 이에 따라 그림 1과 같이 전기적인 정보 처리와 버퍼 기능이 없는 광 경로층

(optical path layer)을 기존의 기간 전송망에 도입하여 대용량 정보를 경제적으로 전달하는 완전 광전달망(all optical transport network)을 구성할 수 있게 되었다^[1,6,7,16,18,19,20]. 일반적으로 파장 라우팅 기술을 사용하는 완전 광 WDM(Wavelength Division Multiplexing)전달망은 링(ring)과 메쉬(mesh) 형태의 토폴로지(topology)를 적용하고 있다. OXC(Optical Cross-Connection)를 사용하는 메쉬 형태의

* 주성대학(ankang@ns.jsc.ac.kr)
** 성균관대학교 전기전자컴퓨터 공학부 전자통신 연구실(yks98@nature.skku.ac.kr)
*** 한국 전자통신 연구원
논문번호 : 98491-1110, 접수일자 : 1998년 11월 10일

구성은 기존 전기통신망에서 많은 관심을 갖는 토폴로지로 높은 연결성을 갖고 망 자원을 효율적으로 관리하지만 복잡성, 고비용 등의 단점을 갖고 있다. OADM(Optical Add-Drop Multiplexing)을 사용하는 링은 망 구조가 규칙적이며 제한적이나 라우팅 구조가 간단하고 망 자원의 제어 및 관리가 비교적 쉬운 토폴로지로서, 낮은 복잡성, 높은 신뢰성과 복구성이 가능한 이점들을 갖고^[1,13,15,18,19,20] 초기에 활발히 사용될 것으로 예상되는바 완전 광 WDM-OADM 구조를 본 연구 대상으로 선정하였다.

본 논문에서는 기존에 개별적으로 연구되던 몇 가지 WDM 구조를 파장 수와 LT(Line Transceiver) 수의 파라미터를 사용하여 상대적으로 비교하였다. 또한, 완전 광 네트워크(FON: Fully Optical Network)가 초기 완전 광전달망 구조에 적합하고 경제성을 입증하였으며, 네트워크를 확장하는 경우에 기존 구조를 변경하지 않고 광 경로와 파장을 할당하는 알고리즘을 연구하였다.

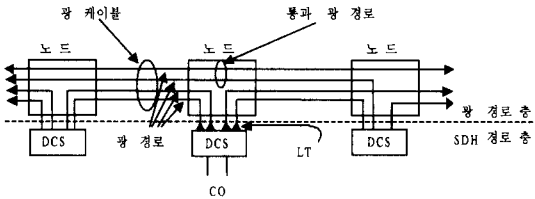


그림 1. 완전 광WDM 구조에서 OADM 노드의 기능

II. WDM 링 구조의 분석

본 장에서는 광 케이블로 구성할 수 있는 몇 가지 링 구조를 WDM 네트워크에 적용하였을 경우의 이점과 트래픽 특성을 분석한 후, WDM-OADM을 이용하여 구성할 수 있는 WDM 구조 중에서 PPWDM(PointtoPoint WDM), SHWDM(Single Hubbed WDM), 완전 광WDM(fully optical WDM)^[20], 그리고 DHWDM(Double Hubbed WDM)을 대상으로 요구되는 파장 수와 LT 수를 산출하였다. 이에 따라 그림 3과 같이 LT 수가 최소이며 적절한 파장 수로 구성되는 완전 광WDM 구조가 초기 완전 광전달망에 적합할 것으로 분석되었다^[18,19,20].

1. 광 케이블 네트워크의 분석

링 구조의 광 케이블 네트워크를 분석하기 위하여 양방향 광 경로를 통해 N개의 노드가 상호 연결되는 가상 메쉬(virtual mesh) 구조의 네트워크를 가정한다. 가장 간단한 물리적 구조는 전체 노드를 점대점으로 연결하는 광 케이블 메쉬(fiber mesh)이다. 이 네트워크의 모든 광 케이블이 케이블 관을 따라 단일 경로를 통과한다고 가정할 때, 필요한 광 케이블 수 F_m 은 상향 링크와 하향 링크를 포함하여 $(N^2-1)/4$ 이 되며^[16], 노드 수와 채널 수가 늘어날수록 링크 비용이 증가된다. 이 구조는 고정된 트래픽 패턴에 적합하지만 설정된 경로와 용량을 수정하는데 많은 노력과 시간이 요구된다. 여기에 케이블당 N-1의 WDM 다중화를 적용하고 링으로 OXC를 연결할 경우, 광 계층에서 WDM-OXC 구조의 광 케이블 수 F_{oc} 가 $(N+1)/4$ 로 감소하여 링크 비용이 감소되지만 라우팅과 스위칭 기능의 추가로 노드가 복잡해져 노드 비용은 증가된다. 한편 라우팅 기능 없이 모든 링크를 1:1로 연결하는 WDM-OADM 구조의 광 경로 수는 $N(N-1)$ 이 되고, N-1 파장에 WDM을 적용한 후 최단 거리로 광 경로를 분리(splitting)하면 광 케이블의 수 F_{ad} 는 $N/2$ 이 된다^[21]. 한 쌍의 WDM 다중화와 여다중화기, 광 스위치로 구성되는 광 계층의 OADM 노드는 OXC 노드보다 광 케이블 수가 많지만 라우팅없이 삽입/추출(add/drop) 및 통과(pass through)의 기능만 수행하므로 노드의 동작이 간단하고 LT 수가 적어 경제적으로 네트워크를 구성할 수 있다^[1,18-21].

2. WDM 링 구조의 트래픽 특성

광 계층은 다중화된 트래픽을 상위 계층과 관계 없이 직접 라우팅하므로 상위 계층의 SDH (Synchronous Digital Hierarchy)/ADM 수를 줄이고 네트워크의 트래픽 관리(grooming)를 효율적으로 할 수 있다. 동일 트래픽 특성의 N개 노드로 구성되는 완전 메쉬(full mesh) 형태의 광 계층 네트워크에서 한 노드에 삽입/추출되는 전체 트래픽을 t 라 할 때, 각 노드 사이를 연결하는 광 경로(lightpath) 하나의 트래픽은 $t/(N-1)$ 값을 갖는다. 노드 i 와 j 사이의 광 경로 수를 $T(i,j)$ 로 나타내면 네트워크의 전체 트래픽 패턴을 매트릭스 $T=[T(i,j)]$ 로 표시할 수 있다. 이때 상위 계층의 트래픽 스트림을 나타내는 정수 값 C 를 이용하면 노드 i 와 노드 j 사이에 최대 $CT(i,j)$ 의 트래픽 스트림이 전달 가능하다. 예를 들

어 10Gbps의 파장 하나와 i와 j 사이의 트래픽 $8 \times OC-48$ 을 가정하면 C는 4의 값을 가지고 $T(i,j)=2$ 가 된다. 또한 노드가 종단할 수 있는 최대 광 경로 트래픽을 $t(i)(i=0,1,\dots,N-1)$ 라 하면, $t(i) \geq \sum_{j=0}^{N-1} T(j,i)$ 와 $t(i) \geq \sum_{j=0}^{N-1} T(i,j)$ 의 트래픽을 수용하는 노드 i의 최대 트래픽 스트림 수는 항상 $Ct(i)$ 가 된다. $t(i)$ 가 적다는 것은 많은 광 경로들이 노드 i에서 종단되지 않고 통과됨을 의미한다^[20].

3. WDM 링 구조의 비교

본 절에서는 양방향 완전 메쉬 형태 WDM 링 구조의 특성과 경제성을 분석하기 위하여 LT 수, 파장 수, 홉(hop) 수 등의 파라미터를 이용하였다.

○ LT 수(Q) : 경제성과 밀접한 파라미터로 트래픽을 지원하는 SDH/LT 수를 의미하며, LT 수가 적을수록 네트워크는 경제성을 갖는다. 모든 구조의 링은 최소 $Q = \lceil t \rceil$ 를 필요로 한다.

○ 파장 수(W) : 광 경로층의 트래픽을 나타내는 파라미터로 할당되는 파장 수가 적을수록 경제적인 망 구조가 된다. 파장의 사용이 증가하면 광 계층의 장비 비용이 추가적으로 발생하게 된다.

○ 홉 수(H) : 광 경로가 경유하는 길이를 나타내는 파라미터로 홉 수가 증가할수록 링크의 용량은 증가하고 노드는 더욱 복잡하게 된다. 그러므로 네트워크의 광 경로는 최단(shortest)의 홉 수를 갖는 방향으로 설정되어야 한다.

1) 일반 WDM 링 구조의 이론적인 최소 파장 수

노드 i와 노드 j 사이의 최소 거리 h_{ij} 는 해당 광 경로의 최소 홉 수를 가르키며, 균일 트래픽(uniform traffic)의 정적(static) 링 구조에서 필요로 하는 식 (1)의 최소(lower bound) 평균 홉 수는 모든 광 경로의 홉 수를 전체 연결 수(connection number)로 나눈 값이다. 최소 파장수는 네트워크의 전체 트래픽이 모든 링크에 균등히 분배되었을 때 링크 하나에 요구되는 최소 트래픽으로 평균 트래픽보다 큰 최소의 정수 값이다. 식 (3)의 평균 트래픽은 네트워크의 전체 트래픽 식 (2)를 광 경로의 최소 평균 홉 수 식 (1)과 곱하여 전체 링크 수 N으로 나눈 값이다. 노드의 전체 트래픽 t를 양방향으로 전달할 때 네트워크의 전체 트래픽은 식 (2)와 같이 된다. 링 구조는 노드 수가 홀수인 경우와 짝수인 경우에 따라 광 경로의 방향, 노드의 홉 수, 트래픽 형태가 다르므로^[16] 서로 구분하여 식 (4)의

최소 파장 수 W를 구하면, 홀수 노드인 경우의 최소 파장 수는 식 (5)와 같고, 짝수 노드인 경우는 식 (6)과 같다^[20].

$$H_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h_{ij}}{N(N-1)} \tag{1}$$

$$\text{전체 트래픽 용량} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T(i,j) \tag{2}$$

$$L_{\text{avg}} = \frac{H_{\min} \times \text{전체 트래픽 용량}}{\text{링크 수}} \tag{3}$$

$$W = \lceil L_{\text{avg}} \rceil \tag{4}$$

○ 노드가 홀수인 경우

$$\sum_{j=1}^N h_{ij} = 2(1+2+\dots+\frac{N-1}{2}) = \frac{(N-1)(N+1)}{2} = \frac{N^2-1}{4}$$

$$H_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h_{ij}}{N(N-1)} = \frac{\frac{N^2-1}{4}}{N-1} = \frac{N+1}{4}$$

$$L_{\text{avg}} = \frac{(N+1)}{8} t$$

$$W = \lceil L_{\text{avg}} \rceil = \left\lceil \left(\frac{N+1}{8} \right) t \right\rceil \tag{5}$$

○ 노드가 짝수인 경우

$$\sum_{j=1}^N h_{ij} = 2 \left[1+2+\dots+\left(\frac{N}{2}-1\right) \right] + \frac{N}{2} = \left(\frac{N}{2}-1\right) \frac{N}{2} + \frac{N}{2} = \frac{N^2}{4}$$

$$H_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h_{ij}}{N(N-1)} = \frac{N^2}{4(N-1)} = \frac{N+1}{4} + \frac{1}{4(N+1)}$$

$$L_{\text{avg}} = \frac{1}{2} \left(\frac{N+1}{4} + \frac{1}{4(N-1)} \right) t$$

$$W = \lceil L_{\text{avg}} \rceil = \left\lceil \frac{1}{2} \left(\frac{N+1}{4} + \frac{1}{4(N-1)} \right) t \right\rceil \tag{6}$$

2) PPWDM의 링 구조

PPWDM 구조는 모든 링크가 점대점으로 구성되는 구조로서, 광 경로는 인접 노드 간에만 설정되어 노드의 OADM은 광 경로의 통과 없이 단지 삽입/추출만 하며, 라우팅 기능은 SDH 계층의 DCS(Digital Cross-Connect System)에서 수행된다.

각 노드에서 전송되는 전체 트래픽은 인접 노드에서 모두 추출되므로 노드 간의 광 경로 수는 최소 파장 수와 일치한다. 또한 각 노드에서 모든 파장들이 수신되고 재전송되므로 한 노드의 LT 수는 파장 수의 2배가 되며, 광 경로의 홉 수는 1이 된다. 본 구조는 노드 수의 구성에 따라 트래픽 특성이 변하므로 짝수일 때와 홀수일 때로 구분하여 파장 수를 구하면 식 (7)과 같고, 네트워크의 전체 LT 수는 식 (8)과 같이 한 노드의 LT 수 $2W$ 에 노드 수 N 을 곱한 값이다^[20].

$$W = [L_{avg}] = \begin{cases} \left\lceil \left\lfloor \frac{N+1+\frac{1}{N-1}}{8} \right\rfloor \right\rceil & (N: even) \\ \left\lceil \left\lfloor \frac{N+1}{8} \right\rfloor \right\rceil & (N: odd) \end{cases} \quad (7)$$

$$Q = 2NW \quad (8)$$

3) SHWDM의 링 구조

SHWDM 구조는 일반 노드의 모든 트래픽이 허브를 경유하도록 링에 하나의 허브 노드를 추가한 구조로서, 허브 노드는 모든 파장을 종단하는 LT와 라우팅하는 DCS로 구성된다^[13]. 허브 노드를 제외한 일반 노드는 트래픽을 삽입/추출하는 LT로 구성된다. 완전 메쉬 형태의 SHWDM 구조에서 모든 광 경로는 일반 노드와 허브 노드 h 사이에 설정된다. 즉, 노드 i 에서 노드 j 로의 트래픽은 두 개의 광 경로를 통해 라우팅(한 경로는 i 에서 h , 다른 경로는 h 에서 j) 한다. 이때 노드 i 와 허브 노드 h 사이는 $(N-1)$ 개의 광 경로가 설정되어 네트워크의 전체 광 경로 수는 $N(N-1)$ 이 된다. 전체 트래픽은 허브를 기준으로 시계방향과 반시계방향으로 동작하므로 전체 파장 수의 반을 재사용할 수 있다. 허브를 통해 설정되는 모든 광 경로의 LT 수와 파장 수는 식 (9), (10)과 같으며, 가장 긴 광 경로의 홉 길이는 $H = N-1$ 이다^[20].

$$Q = 2N(N-1) \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \quad (9)$$

$$W = \left\lceil \frac{N}{2} (N-1) \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \right\rceil \quad (10)$$

4) DHWDM의 링 구조

두 개의 허브를 통하여 새로운 노드와 트래픽을 쉽게 네트워크에 수용하고 재배열할 수 있는 R-NB(Rearrangeably Non-Blocking)의 장점을 갖는 DHWDM 구조는 트래픽 변화가 심한 네트워크에 사용되는 구조로서^[13], 본 연구에서는 이 구조에 대한 특성을 추가로 연구하여 WDM 구조에서 사용될 주요 구조들을 전체적으로 상대 비교하였다. 그림 2와 같은 양 방향 완전 메쉬 형태의 DHWDM은 링에 2개의 허브 노드를 추가한 구조로서 트래픽은 해당 노드와 가까운 허브로 라우팅되며, 허브와 허브 사이의 트래픽은 다른 네트워크를 통해 허브 간의 광 경로를 라우팅한다. SHWDM 구조와 같이 일반 노드는 가까운 허브와 $(N-1)$ 개의 광 경로를 설정하므로, 네트워크의 모든 노드에 대한 트래픽을

수용하기 위해서는 $2N(N-1) \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil$ 의 LT가 필요하다. 노드 수를 $N=4k$ 로 가정하면 허브 1 관할 영역의 한 쪽(왼쪽 또는 오른쪽) 노드 수는 k 개가 되며, 여기서 사용하는 파장은 허브 1 관할 영역의 다른 한 쪽과 허브 2 관할 영역의 양 쪽에서 같은 파장을 재사용할 수 있으므로, 본 구조의 파장 수는

$\left\lceil k(N-1) \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \right\rceil$ 가 된다. 노드 i 가 허브 1의 관할 영역에 속한다고 가정하면, 노드 i 로부터 허브 2의 관할 영역에 속하는 $2k$ 개의 노드에 대한 트래픽은 두 허브들에 의해 라우팅된다. 즉, 노드 i 가 허브 1 관할 영역에, 노드 j 가 허브 2 관할 영역에 속한다면, 두 노드 사이의 광 경로는 파장 수 $\lceil t(N-1) \rceil$ 를 가지므로 $4k^2$ 의 전체 노드 쌍에 의해 발생하는 두 허브 사이의 파장 수는 $4k^2 \times \lceil t(N-1) \rceil$ 가 요구된다. 전체 트래픽의 50%는 시계 방향으로 다른 50%는 시계 반대 방향으로 라우팅하여 허브와 허브 사이의 전체 LT 수 Q_{hub} 와 네트워크의 전체 LT 수 Q , 허브와 허브 사이의 전체 파장 수 W_{hub} 와 네트워크의 전체 파장 수 W 를 구하면 다음 식과 같으나, 실제 링의 전체 파장 수는 식 (11.4)에서 허브와 허브 사이의 파장 수인 식 (11.2)를 제외한 값이다.

$$Q_{hub} = 4 \times 2k^2 \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \quad (11.1)$$

$$W_{hub} = 2k^2 \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \quad (11.2)$$

$$Q = 2N(N-1) \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil + 4 \times \frac{N^2}{8} \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \quad (11.3)$$

$$W = \left\lceil \frac{N}{4} (N-1) \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \right\rceil + \frac{N^2}{8} \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \quad (11.4)$$

$$L = 1+2+3+\dots+\frac{N}{2} = \frac{N^2}{8} + \frac{N}{4} \quad (12.1)$$

$$W = \left\lceil \frac{t}{N-1} \left(\frac{N^2}{8} + \frac{N}{4} \right) \right\rceil \quad (12.2)$$

$$Q = N(N-1) \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \quad (12.3)$$

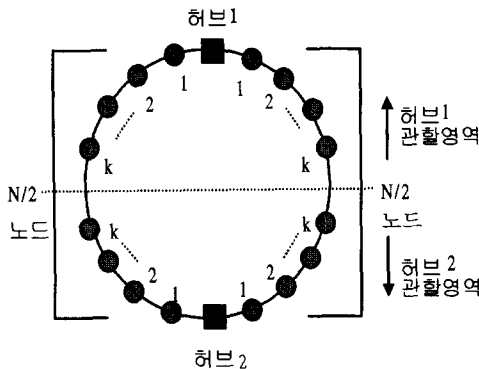


그림 2. DHWDM의 링 구조

5) 완전 광WDM의 링 구조

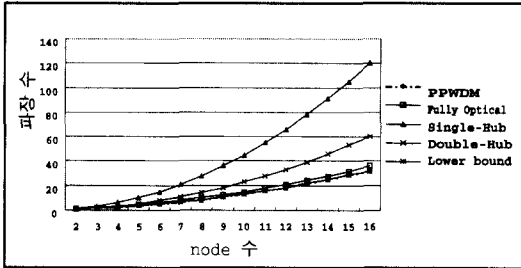
완전 광 WDM 구조는 소스 노드와 목적지 노드 사이의 광 경로를 통해 정보를 전송하는 구조로서 SDH/ADM, DCS등의 전기적 장비를 이용하지 않고 광 경로 계층 내의 광 신호를 처리하는 광 소자만을 사용하며, 파장 수와 LT 수는 노드의 특성, 광 경로의 라우팅, 파장 할당 방법에 따라 변화된다. 양 방향 완전 메쉬 형태의 완전 광WDM 구조에서 학습적 알고리즘^[16]을 사용하여 파장 수를 구하면, 노드 수가 홀수인 경우는 PPWDM과 같이 모든 노드 사이의 광 경로수가 동일하게 분배되어 파장 수는 최소 파장 수와 일치하며, 노드 수가 짝수인 경우는 노드 사이의 광 경로 수가 동일하지 않으므로 가장 많은 트래픽 부하가 발생하는 노드 사이의 광 경로 수를 구하면 식 (12.1)과 같다. 네트워크에서 요구되는 전체 파장 수는 식(12.1)에 광 경로 하나의 파장 수 $\lceil t/(N-1) \rceil$ 를 곱한 값이다^[17]. 광 경로 하나에 의해 요구되는 LT 수는 $\lceil t/(N-1) \rceil$ 이고 한 노드의 트래픽을 지원하기 위해 필요한 LT 수는 $(N-1) \lceil t/(N-1) \rceil$ 이므로 전체 LT 수는 식 (12.3)과 같다^[20].

4. WDM 링 구조의 성능 분석

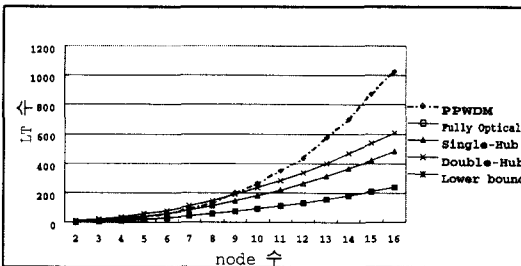
3절에서 연구한 몇 가지의 WDM 링 구조를 노드 수와 트래픽을 변화시키며 각 구조의 파장 수와 LT 수를 상대적으로 비교하면 그림 3과 같다. 파장 수는 WDM의 다중화 범위와 네트워크 구성의 노드 수 설정에 많은 영향을 주고, LT는 광 WDM 구조 중 가장 많은 비용이 요구되는 OLTM(Optical Line Terminating Multiplexing)으로 LT 수가 증가하면 네트워크는 비경제성을 가진다^[13]. 노드 수의 범위는 기존 SDH의 K1, K2 바이트에 있는 노드 ID(Identification) 값에 따라 2부터 16까지로 설정하고^[13], 양 방향 완전 메쉬 형태의 광 WDM 구조에서 모든 노드 사이의 광 경로 트래픽을 단위 파장으로 가정하였다. 전체 네트워크에서 요구되는 노드별 파장 수와 LT 특성을 그림 3(a), 3(b)에 도시하였다. 이 그림에서 PPWDM 구조는 최소의 파장이 요구되거나 노드 수가 9이상일 때는 LT 수가 급격히 증가하여 비경제적이다. DHWDM 구조는 SHWDM 구조보다 파장 수가 적으나 LT 수는 많이 요구된다. 완전 광 WDM 구조의 경우 파장 수는 최소 파장 수보다 많이 요구되거나 LT 수가 적어 경제성있게 구성할 수 있음을 알 수 있다. 또한 이 구조를 홀수 노드의 네트워크로 구성하면 PPWDM 구조와 같은 최소 파장 수가 요구되므로 더 좋은 파장 수의 특성을 갖는다. 노드 수가 8일 경우 노드의 트래픽 부하(traffic load) 변화에 따른 각 WDM 구조의 특성을 분석하여 그림 3(c), 3(d)에 도시하였다. 이 그림에서 DHWDM 구조는 트래픽 부하가 3 이상일 때 가장 비경제적이고, 파장 수는 SHWDM 구조가 가장 많이 요구됨을 알 수 있다. 완전 광 WDM 구조는 한 광 경로의 트래픽 $\lceil t/(N-1) \rceil$ 에 의해 특성 곡선이 계단 형태로 나타나지만 전체 구조 중 가장 적절한 구조로 분석되며, 트래픽 부하가 $(N-1)$ 일 때 가장 좋은 네트워크로 구성된다. PPWDM 구조는 단위 트래픽 구조에서 가장 비경제적이나, 트래픽 부하가 3 이상일 때 DHWDM 구

조보다 경제적이다.

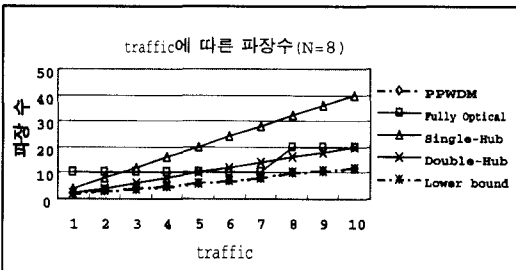
III. 파장 변환을 사용한 완전광 WDM 구조의 분석



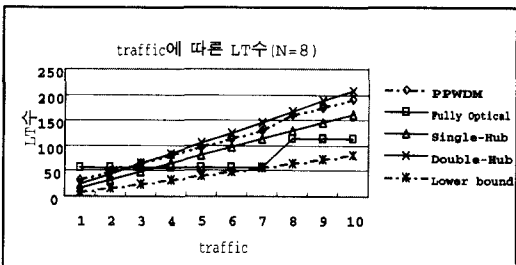
(a) 노드수에 따른 파장 수



(b) 노드수에 따른 LT 수



(c) 트래픽 부하에 따른 파장 수



(d) 트래픽 부하에 따른 LT 수

그림 3. WDM 링 구조에서 요구되는 파장수와 LT수

본 장의 완전 광 WDM구조는 노드가 파장 변환 노드인 것을 제외하고 II.3.5의 구조와 동일한 환경이며, 각 노드 사이의 광 경로는 균등한 단위 파장을 갖는다고 가정한다. 이때 각 노드의 전체 트래픽은 $(N-1)$ 이 된다. 파장 변환은 노드 내에 FC(Full Converter)가 있어 노드를 통과하는 모든 광 경로가 서로 다른 파장을 갖게 된다^[1,14]. 파장 변환이 없는 구조에서 홀수 노드일 때의 충분한 광 경로 수 $(N^2 - 1)/8$ 은 일반 링 구조의 최소 광 경로 수와 같으므로 모든 노드 사이는 동일 수량의 파장을 갖게 되고 파장 변환은 필요하지 않다^[17]. 짝수 노드일 때 요구되는 광 경로 수 $(N^2 + 2N)/8$ 는 완전 광WDM에 충분하지만, 일반 링 구조의 최소 광 경로 수인 $N^2/8$ 의 필수 수량과는 차이가 발생한다. 그러므로 파장 수를 줄이기 위해 파장 변환 기능을 갖춘 노드가 필요하다. 현재 파장 변환기 (wavelength converter) 개발이 급속히 추진되어 일부 완전 광전달망 구조에서 사용되고 있으나 고가의 비용으로 도입하기에 아직 많은 부담이 된다^[1,14,18]. 그러나 본 장에서는 가까운 시기에 보급 확대가 예상되는 경우를 고려하여 파장 변환 노드를 사용하는 네트워크에서 요구될 파장 수를 산출하고 파장 변환이 없는 경우와 비교하였다. 파장 변환 노드를 사용하는 네트워크에서 모든 광 경로는 트래픽 부하가 하나인 홑수 1의 가장 짧은 경로로 제공되며, 홑수가 $k < N/2$ 인 경우의 광 경로는 가장 짧은 경로를 따라 부하 k 를 갖고 라우팅된다. 그러므로 광 경로 길이가 $N/2$ 보다 작은 경우의 전체 트래픽 부하 $W1$ 을 학습적 알고리즘을 사용하여 구하면 식 (13)과 같이 된다.

$$W1 = 1 + 2 + \dots + \frac{N}{2} - 1 = \frac{N^2}{8} - \frac{N}{4} \quad (13)$$

남아 있는 광 경로는 링 구조에서 서로 마주 보는 노드들 사이의 광 경로로 $N/2$ 홑의 길이를 갖는다. 처음에 이 광 경로에서 하나의 광 경로를 선택하여 시계방향으로 라우팅하고, 다음에는 인접한 다른 광 경로를 시계 반대 방향으로 라우팅한다. 이와 같이 광 경로의 방향을 번갈아 가면서 라우팅하여 추가적으로 요구되는 파장 수 $W2$ 를 4의 배수일 경

우와 4의 배수보다 두 노드가 많은 경우로 구분하여 산출하면 식 (14.1), (14.2)와 같이 된다. 이때 W1과 W2를 합하여 전체 파장 수 W를 구하면 식 (15.1), (15.2)와 같이 된다. 파장 변환을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우의 비교는 표 1과 그림 4에 노드의 필수 조건과 충분 조건으로 구분하여 도시하였다. 결국 홀수 노드로 네트워크를 구성하는 것이 더욱 효율적이며, 네트워크를 확장하는 경우 두 노드씩 추가하는 것이 유리할 것으로 분석된다. 또한 홀수 노드로 네트워크를 구성할 때 파장 변환이 필요 없음을 알 수 있다

$$W2 = \frac{N}{4} + 1 \quad (\text{N이 4의 배수일 경우}) \quad (14.1)$$

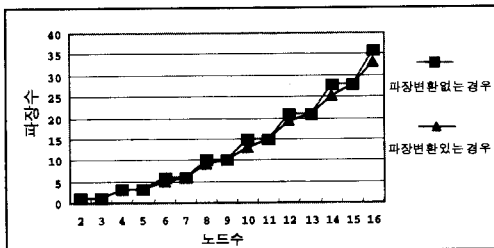
$$W2 = \frac{N+2}{4} \quad (\text{N이 4의 배수+2일 경우}) \quad (14.2)$$

$$W = \frac{N^2}{8} + 1 \quad (\text{N이 4의 배수일 경우}) \quad (15.1)$$

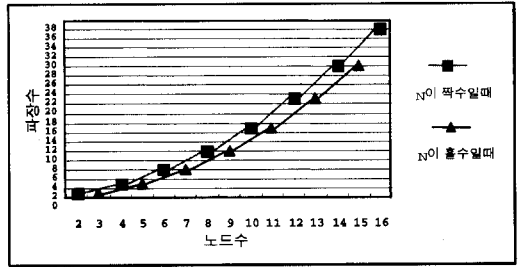
$$W = \frac{N^2}{8} + \frac{1}{2} \quad (\text{N이 4의 배수+2일 경우}) \quad (15.2)$$

표 1. 완전 광 WDM 링 구조에서 요구되는 최적 파장수

노드수	파장 변환이 없는 경우		파장 변환(FC)을 하는 경우	
	필수 조건	충분 조건	필수 조건	충분 조건
홀수	$\frac{N^2-1}{8}$	$\frac{N^2-1}{8}$	$\frac{N^2-1}{8}$	$\frac{N^2-1}{8}$
짝수	$\left\lceil \frac{N^2}{8} \right\rceil$	$\frac{N^2}{8} + \frac{N}{4}$	$\left\lceil \frac{N^2}{8} \right\rceil$	$\frac{N^2}{8} + 1, N=4m$ $\frac{N^2}{8} + \frac{1}{2}, N=4m+2$



(a) 파장 변환 사용의 유무에 따른 비교



(b) 노드 수가 홀수와 짝수일 때의 비교

그림 4. 완전 광WDM 링 구조에서 노드 수에 따라 요구되는 파장수

IV. 완전 광WDM 구조의 파장 할당 알고리즘

기존 광 전달망에서는 뚜렷한 파장 할당 알고리즘이 없었으나 본 연구에서는 확장시 기존 네트워크 구성을 변경하지 않을 뿐만 아니라 파장 수를 최소화 하는 파장 할당 알고리즘을 제안했으며, II.3.5와 같이 양 방향 완전 메쉬 형태의 연결을 갖는 완전 광 WDM 링 구조를 파장 변환 없는 노드로 구성하고 각 노드 사이의 광 경로는 순방향과 역방향의 최단 경로를 갖도록 하였다. 본 파장 할당 알고리즘은 네트워크를 항상 짝수 노드(N_{Even})의 링 구조가 되도록 구성하고, 네트워크를 확장하는 경우 기존 트래픽의 라우팅과 파장 할당을 그대로 유지하면서 두 추가 노드에 의해 발생하는 광 경로에 파장을 할당한다. 세 단계로 동작하는 본 알고리즘의 동작은 첫째, 노드의 위치를 최적으로 선정하여 네트워크를 구성하고, 둘째, 노드와 노드 사이의 광 경로를 설정하며, 마지막으로, GC방식을 사용하여 설정된 광 경로에 파장을 할당한다. 최소의 링 구조는 노드 수가 2일 때이며, 홀수 노드의 링 구조를 위해서는 한 노드가 링에 추가로 있다고 가정한다. 본 장에서는 완전 광전달망 구조에 새로운 파장 할당 알고리즘을 적용하여 노드 설정 원칙에 따라 짝수 노드($N=6$), 홀수 노드($N=9$)의 네트워크를 구성했고 이 구조에서 발생하는 모든 광 경로에 그림 5($N=6$ 인 경우)와 같이 파장을 할당하였다. 또한, 2절에서 본 알고리즘을 적용할 때 얻어지는 파장 수가 II.3.5의 완전 광WDM 링 구조의 최소 파장수와 일치함을 입증하였다. 그림 5와 같이 링 구조의 노드 1을 절단하여 선형 구조로 변경하고 GC (Graph Coloring) 방식^[14,20]을 도입하여 각 노드 사이의 광 경로와 파장 할당이 설정되는 과정을 도시

했다. GC 방식은 노드 사이의 여러 광 경로를 충돌 없이 다른 색으로 표현할 수 있으므로, 광 경로의 파장 할당은 그림 5와 같이 각각의 색이 서로 다른 파장을 할당하면 된다.

1. 제안하는 파장 할당 알고리즘

① 노드 수 N의 네트워크에 두 노드를 추가할 때, 노드 N-1에서 시계 방향으로 인접한 위치에 노드 N+1을 위치시키고 노드 N+2는 노드 N+1과 마주보도록 위치시킨다. 예를 들어, 현재 노드 수가 4 일 때 두 노드를 추가하면, 그림 5와 같이 노드 3에서 시계 방향으로 인접한 위치에 노드 5의 위치를 설정하고 노드 5와 마주 보는 위치에 노드 6을 위치시킨다. 이때 노드 번호는 노드를 추가하는 순서로 부여한다. 홀수 노드의 네트워크는 노드가 하나 더 있다고 가정하여 위치를 선정한다.

② 링을 가로지르며 추가되는 두 노드(노드 번호는 N+1, N+2)에 의해 한쪽 링은 N/2개의 기존 노드(파장이 할당된 노드)를 갖게 된다. 먼저, 노드 N+2→노드 N+1 방향에 있는 N/2개의 기존 노드와 추가 노드 사이에 광 경로를 설정한 후, 동일한 방법으로 노드 N+1→노드 N+2 방향에 광 경로를 설정한다. 이때 N/2의 새로운 광 경로가 시계방향으로 만들어지며, 모든 광 경로 홉 수는 최단 거리 ($H \leq N/2$)를 갖는다. 다음으로, 두 추가 노드 사이의 광 경로를 N+2→N+1의 시계 방향으로 설정하여 파장을 할당한다. 이때 하나의 광 경로가 추가되며, 광 경로 홉 수 $H=(N+2)/2$ 이다

③ 설정되는 광 경로의 순서에 따라 사용하지 않은 최소 번호의 파장 수를 그림 5와 같이 GC 방식을 이용하여 할당한다. 여기서 노드 사이의 광 경로들은 서로 다른 색을 갖고 있어 충돌(color crash)이 없다.

노드 수를 1부터 6까지 하나씩 추가할 때 요구되는 광 경로와 파장을 도시한 그림 5를 살펴보면, 노드 수 2일 때는 파장 하나가 필요하고 두 노드를 추가한 노드 수 4의 경우는 파장 둘이 추가되어, 짝수 노드 N_{even} 의 네트워크에서 두 노드를 추가하면 파장 수 $N_{\text{even}}/2 + 1$ 이 추가된다. 한편 홀수 노드의 네트워크 구조에서 노드 수 3일 경우는 파장 수가 1개, 노드 수 5 경우는 2개가 추가되므로 노드 수 N_{odd} 일 때 두 노드를 추가하면 파장 수 $(N_{\text{odd}}+1)/2 + 1$ 이 추가된다. 또한 그림 5와 같이 짝수 노드의 네트워크에 노드 하나를 추가하여 홀수 노드의 네트워크로 변경되어도 파장 수가 추가로 요구되지 않

으며, 홀수 노드의 구조는 각 노드 사이에 광 경로가 모두 설정되어 트래픽이 균등히 분배되나, 짝수 노드의 구조에서는 노드 사이에 광 경로가 균등히 설정되지 않아 네트워크 구성이 일정하지 않고 파장 낭비가 발생함을 알 수 있다. 또한, 그림 5의 선형 구조를 링 구조로 변경하면 광 경로와 파장 할당이 그림 6과 같이 된다.

이에 따라 본 논문에서 제안한 새로운 파장 할당 알고리즘은 완전 광WDM 링 구조에서 파장 수를 최적으로 하면서 파장을 할당할 수 있으며, 네트워크를 확장할 때는 기존 구조의 광 경로와 할당된 파장을 변경하지 않고 광 경로와 파장을 추가로 할당할 수 있으므로 네트워크의 확장성이 용이하고 경제적인 확장이 가능함을 알 수 있다.

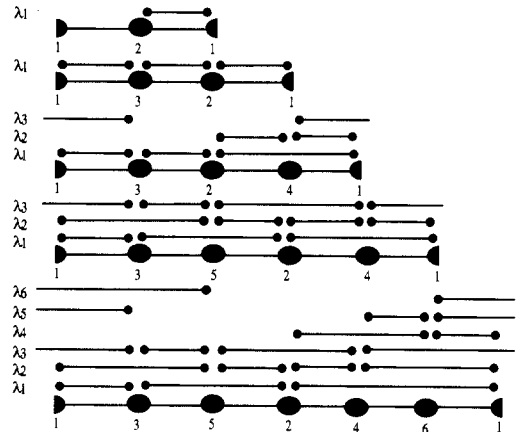


그림 5. 선형 구조에서 파장 할당 알고리즘에 따라 할당된 광 경로

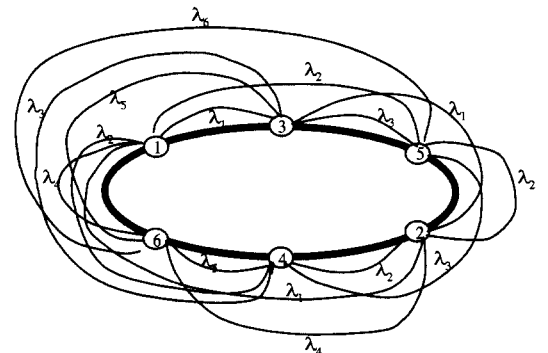


그림 6. 노드수가 6인 경우의 파장 할당

2. 파장 할당 알고리즘에 따른 최소 파장 수의 분석

본 절에서는 파장 변환을 사용하지 않는 완전 매쉬 형태의 완전 광WDM 구조에 본 연구에서 새롭게 제안한 파장 할당 알고리즘을 적용할 때, 알고리즘에 의해 얻어지는 파장 수가 II.3.5의 최소 파장 수와 일치함을 설명하여 본 알고리즘의 타당성을 입증하고자 한다. 알고리즘에서 기존 네트워크(노드 수: N_{old})에 추가되는 두 노드는 기존 노드와 시계 방향과 반시계 방향의 최단 경로로 광 경로를 설정하여 확장 네트워크(노드 수: N_{new})를 구성하고, 추가 광 경로 수는 홀수 노드의 경우 $\frac{N_{old}-1}{2}+1$,

짝수 노드의 경우 $\frac{N_{old}}{2}+1$ 이 된다. 광 경로가 단위 트래픽 부하를 가질 때 홀수 노드 구조에서 요구되는 파장 수를 산출하면 식 (5)가 식 (16.1), (16.2)와 같이 된다. 이때 그림 7(b)와 같이 두 노드를 추가하면 전체 파장 수는 기존 구조의 파장 수보다

$\frac{N_{old}-1}{2}+1$ 의 파장이 추가되어 식 (17)과 같이 된다. 따라서 알고리즘에 의해 얻어지는 추가 파장 수를 기존 파장 수에 더하면 추가 노드의 구조에서 산출되는 최소 파장 수와 일치함을 알 수 있다. 짝수 노드의 구조도 그림 7(a)와 같이 두 노드를 추가하여 홀수 노드와 동일한 환경에서 분석하면, 식 (19)와 같은 전체 파장 수를 얻을 수 있어, 알고리즘을 적용한 경우와 하지 않은 경우의 파장 수가 항상 일치함을 알 수 있다. 이에 따라 본 연구에서 제안하는 알고리즘을 적용하여 노드를 추가할 때, 기존 네트워크를 재 구성하지 않고 최소 파장 수로 새로운 네트워크를 구성할 수 있음을 알 수 있다.

○ 홀수 노드의 경우

$$W(3) = \frac{3^2 - 1}{8} = 1 \quad (N=3) \quad (16.1)$$

$$W(N) = \frac{N^2 - 1}{8} \quad (N \geq 3) \quad (16.2)$$

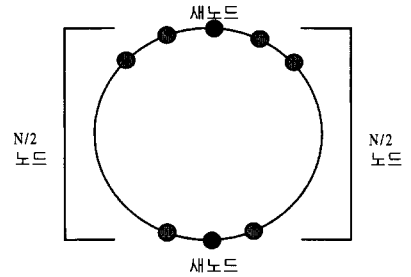
$$W = \frac{N_{old}^2 - 1}{8} + \frac{N_{old} - 1}{2} + 1 = \frac{(N_{old} + 2)^2 - 1}{8} = \frac{N_{new}^2 - 1}{8} \quad (17)$$

○ 짝수 노드의 경우

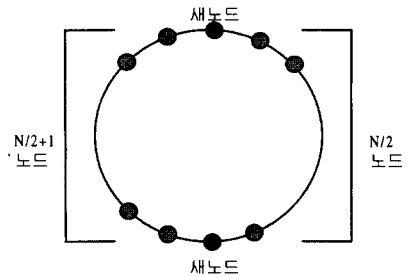
$$W(2) = \frac{2^2}{8} + \frac{2}{4} = 1 \quad (N=2) \quad (18.1)$$

$$W(N) = \frac{N^2}{8} + \frac{N}{4} \quad (N \geq 2) \quad (18.2)$$

$$W = \frac{N_{old}^2}{8} + \frac{N_{old}}{4} + \frac{N_{old}}{2} + 1 = \frac{(N_{old} + 2)^2}{8} + \frac{N_{old} + 2}{4} = \frac{N_{new}^2}{8} + \frac{N_{new}}{4} \quad (19)$$



(a) 짝수 구조에서의 노드 추가



(b) 홀수 구조에서의 노드 추가

그림 7. 완전 광WDM 구조에서의 두 노드 추가

V. 결론

본 논문에서 완전 광전달망의 주요 구조들을 고찰한 결과, PPWDM 구조는 가장 최소의 파장 수로 트래픽을 수용하는 이점이 있으나 광 계층에서 광 경로가 직접 통과하지 못하므로 많은 LT 수가 요구되는 단점이 있고, 기존 트래픽을 변경하지 않고 쉽게 추가하는 SHWDM 구조는 많은 파장 수가 요구되는 비경제적인 단점이 있다. DHWDM 구조는 트래픽을 쉽게 추가하고 재정렬할 수 있으나 경제성과 허브 노드의 복잡성에 많은 단점을 갖는다. 완전 광WDM 구조는 모든 링 구조 중 가장 경제적이고

파장 수가 적절하며 간단히 트래픽 관리를 할 수 있어 초기 완전 광 전달망에 도입될 구조로 분석되었다. 이에 따라 본 논문은 이 구조를 대상으로 새로운 파장 할당 알고리즘을 제안하였다. 또한 파장 변환 노드가 현재는 비경제적이지만 보급이 활성화 되어 경제성이 있을 경우를 대비하여, 본 논문은 파장 변환 노드를 사용하는 완전 광WDM 구조에서 요구되는 파장 수를 산출하고 파장 변환이 없는 경우와 상호 비교하였다.

본 연구에서 제안한 파장 할당 알고리즘은 기존 망을 재정렬하지 않고 최적으로 네트워크를 확장할 수 있으며, 이때 추가 파장 수는 학습적 알고리즘으로부터 직접 산출한 최소 파장 수와 일치하였다. 또한, GC방식을 이용하여 파장을 할당한 결과, 짝수 노드보다 홀수 노드의 네트워크가 파장을 낭비하지 않을 뿐만 아니라 파장 변환 노드를 사용하지 않고도 최적으로 구성 가능함을 알 수 있었다. 본 연구는 현재 추진되고 있는 초고속 정보통신망의 완전 광 전달망을 초기에 효율적으로 설계하는데 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] M.Carnot, F.Masetti, L.nederlof, G.Eilenberger, S.Bunse, A.Aguilar, "Dimensioning and Optimization of the wavelength-Division-Multiplexed Optical Layer of Future Transport Networks", *IEEE ICC 98*, pp.202 -206, 1998

[2] 박영일, "파장 다중 전송 기술," *한국통신 전송기술 연구소 정보통신연구지*, 7,1997.

[3] K. Sato, S. Okamoto, and A. Watanabe, "Photonic transport networks based on optical paths", *INT.J. Commun. Sys.*, Vol.8, pp.377-389. 1995.

[4] Chang-Hee Lee, "Optical transport network based on optical path layer", *제1회 차세대 광통신시스템 워크샵*, 서강대학교,1996.

[5] Paul E. Green, "Optical networking update", *IEEE J. Select. Areas Commun.*,Vol.14, pp.764-779,1996.

[6] ITU-T Draft Recommendation G.otn, Architecture of Optical Transport Networks, 4, 1997.

[7] ITU-T Draft Recommendation G.mcs, Optical

Interfaces for Multichannel Systems with Optical amplifiers , 4, 1997.

[8] ITU-T Draft Recommendation G.803, "Architectures of transport network based on the synchronous digital hierarchy (SDH)", *CCTTT Meeting Report R-106(WP XVIII)*, 7, 1992

[9] S. Hasegawa, A. Kanemasa, H. Sakaguchi and R. Maruta, "Dynamic reconfiguration of digital cross connect systems with network control and management", *IEEE GLOBECOM 87*, 11, 1987.

[10] K.Sato, S.Ohta and I. Tokizawa, "Broadband ATM network architecture based on virtual path ,"*IEEE Trans. Commun.*, Vol 38,NO.8, pp.1212-1222, 8,1990.

[11] H.Toba, K.Oda, K.Nakanishi, K.Nosu, N.Takato and M.Fukuda, "A 100-channel optical FDM transmission /distribution at 622 Mb/s over 50 km", *J.Lightwave Tech.*,Vol.8,No.9,pp.1396 1401,1990.

[12] S.Okamoto and K.sato, "Photonic transport network and the cross connect system architecture", *Technical Report of IEICE*, CS92-49, 10,1992.

[13] Tsong-Ho Wu, *Fiber Network Service Survivability*, Artech House, Boston,1992.

[14] R.Ramaswami, G.H.Sasaki, Multi wavelength Optical Networks with Limited Wavelength Conversion, *IEEE INFOCOM 97*, pp.490-499, 1997.

[15] Ching-Chir Shyur, Ying-Ming Eu , A Capacity Comparing for SONET Self-Healing Ring Networks", *IEEE GLOBECOM 93*, pp.1574-1578, 1993.

[16] L. Wuttisittikulkij, M.J.Omahony, Design of an Efficient and Practical Algorithm for Wavelength Assignment in Multi-Wavelength Ring Transport Networks, *IEEE GLOBECOM 97*, pp.571-575, 1997.

[17] Ori Gerstel, "Wavelength assignment in a WDM ring to minimize cost of embedded SONET rings", *IEEE INFOCOM 98*, 2,1998.

[18] Biswamath Mukherjee, *Optical CommunicationNetworks*, McGrawHill ,1997.

