

論文2001-38TC-8-3

WDM 전광망에서 라우팅과 파장할당을 위한 휴리스틱 방법에 대한 연구

(A Study on Heuristic Approaches for Routing and Wavelength Assignment in WDM All-Optical Networks)

金基源 * , 鄭榮哲 **

(Ki won Kim and Young chul Chung)

요 약

최근 인터넷 응용계층, 사용자수와 IP 백본망에서 트래픽의 폭발적인 증가는 전송망에 대해서 새로운 변화를 요구하고 있다. 이에 따라 대용량 WDM시스템들이 광범위하게 설치되고 있으며 이를 인터넷에 효율적으로 운영하기 위하여 IP/WDM을 구현하려는 노력이 진전되고 있다. WDM 전광망의 이용이득을 얻기 위해서는 IP 계층의 라우팅 프로토콜과 함께 전광망의 물리적인 망을 효율적으로 활용하게 해주는 논리적 토폴로지를 형성하고 광망을 제어하는 소프트웨어가 필요하다. 이를 위하여 WDM 전광망에서의 라우팅과 파장할당(RWA)을 효율적으로 수행할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 WDM 전광망의 논리적인 토폴로지 형성을 위한 두 개의 직관적인 알고리즘을 구현하여 국내 백본망에 적용하였으며, 이들이 잘 동작함을 보였고 이들을 블록킹율등의 측면에서 비교분석하였다.

Abstract

The recent explosion in the Internet applications, Internet host number and the traffic in the IP backbone network is posing new challenges for transport network. This requires a high-speed IP backbone network that has a substantially higher bandwidth than the one offered by current networks, which prompts the development of all-optical network. To obtain optical network utilization gains, we need a software which establishes logical topology to make possible the efficient use of physical topology, and control the optical network in combination with the IP layer routing protocols. Finally, the logical topology is required higher efficient than physical topology. For this an efficient algorithm for the routing and wavelength assignment(RWA) in the WDM all-optical network is necessary. In this paper, two kinds of heuristic algorithms to establish logical topology for WDM networks and are applied to the design of logical topology of domestic backbone network. These algorithms are found to work quite well and they are compared with each other in terms of blocking rate, etc.

* 正會員, 韓國電子通信研究院 Network研究所 光通信 연구부

(Optical Communications Department, Network Laboratory, Electronic and Telecommunications Research Institute(ETRI))

** 正會員, 光云大學校 電子工學部/電子通信工學科

(School of Electronics Engineering, Kwangwoon University)

接受日:2000年10月31日, 수정완료일:2001年7月4日

I. 서 론

최근 인터넷 서비스에 대한 수요가 폭발적으로 증가함에 따라서 현재의 네트워크가 제공하는 대역폭으로는 대용량의 정보를 원활하게 수용하는 하기에는 어려움이 있다. 다양한 대용량의 멀티미디어 트래픽을 안정적이고 고품질의 통신 서비스로 전달하기 위한 유력한 방안으로써 파장분할 방식(WDM : Wavelength Division

Multiplexing)의 전광네트워크(all-optical network)이 전 세계적으로 확산되고 있다^[1-3]. 시스템 구현 측면에서 보았을 때, 기존의 전자적인 라우팅의 주요문제로서 높은 장비 비용, 크기, 낮은 scalability, 고가이며 복잡한 망관리와 증가하는 전송지연 등이 있다. WDM 전광네트워크는 라우팅노드간의 광적인 처리에 의해서 전자적인 라우팅을 제거한 하부구조를 제공함으로써 전체 네트워크의 설치 및 유지비용을 절감할 수 있다^[4].

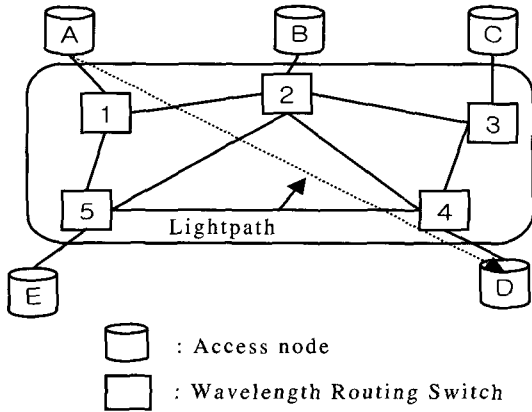


그림 1. WDM 전광네트워크 구조
Fig. 1. A WDM all-optical network architecture.

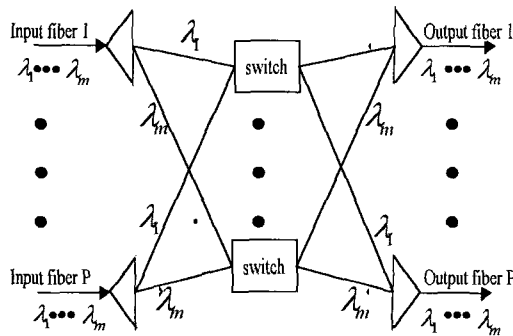


그림 2. 재구성능력을 가진 파장 라우팅 스위치
Fig. 2. Reconfigurable wavelength routing switch.

본 논문에서 논의하는 WDM 전광네트워크의 물리적인 토폴로지(physical topology)는 그림 1에서 보듯이 메쉬 토폴로지이다. 네트워크의 노드는 point-to-point 광섬유 링크들로 연결된 파장 라우팅 스위치(WRS : wavelength routing switch)로 구성된다^[5]. 종단 노드들은 파장 라우팅 스위치의 라우팅 노드에 연결되어 있고 제한된 수의 광송신기와 광수신기를 갖는다. 광섬유 링크들은 WDM 파장채널들을 전달할 수 있다. 그림 2

에서 보듯이 라우팅 노드는 입력포트들 중의 한 입력 포트에 특정 파장으로 입력된 신호를 실어주고 원하는 출력포트로 라우팅한다. 라우팅 노드는 M 개의 파장을 운용할 수 있고 링크수(E_p)만큼의 입력포트와 출력포트를 각각 갖는다. 파장 라우팅 스위치는 파장에 관계없이 $E_p \times E_p$ 로 재구성할 수 있고, 파장변환 기능이 없는 스위치이다.

이러한 스위치를 갖는 WDM 전광네트워크는 라우팅 노드와 종단 노드들로 구성된 물리적인 집합이다. 노드는 광섬유 링크로 연결되어 있고 종단 노드 사이에서 광경로(lightpath) 집합을 형성한다. 하나의 광경로는 종단노드의 한쌍에 의해서 형성되며 하나의 파장으로 할당된다^[8-10,12]. 여기서 두 광경로가 하나의 광섬유 링크를 공유하고 있다면 서로 다른 파장으로 할당해야만 한다. 광경로는 전광으로 형성된 광경로(all-optical lightpath)로 종단 노드간에 파이프 라인을 제공함으로써 고속의 대용량 정보를 전송한다. 각각의 광경로는 한 채널(channel)을 의미하고 같은 대역폭을 갖는다. 이러한 광경로를 이용해서 WDM 전광네트워크의 논리적인 토폴로지가 형성된다. 여기서 논리적인 토폴로지 설계는 파장수, 광송신기와 광수신기의 수, 파장연속성(wavelength-continuity)등의 물리적인 제약조건을 갖는다. 따라서 효율적인 논리적 토폴로지 설계는 광경로의 설정기법과 광경로의 라우팅 기법이 중요하다.

최근 WDM 전광네트워크의 논리적인 토폴로지(logical topology) 설계를 위한 라우팅과 파장할당에 관한 연구가 많이 되어 왔다^[6-17]. 최적의 논리적 토폴로지 설계는 NP-hard이므로 근사적으로 구하고 있다^[8]. I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi들은 처음으로 물리적 광섬유 기반의 광스위치 망에 패킷 스위치 방식의 논리적 토폴로지를 소개하였다^[9]. 정규적인 구조를 갖는 논리적 토폴로지는 노드에서 발생하는 전자적인 처리를 줄이는 간단한 라우팅 및 혼잡제어, 그리고, 네트워크 구현을 간단하게 한다. 그러나, 비대칭적 트래픽 특성을 갖을 때는 병목현상(bottleneck)을 초래하기 때문에 전체적인 네트워크의 특성(예 : 평균지연과 평균홉거리 증가)을 저하시키는 단점이 있다^[9,12]. 또 다른 패킷 스위치 망의 논리적인 토폴로지 설계 알고리즘은 주어진 트래픽 행렬에 대해서 혼잡을 최소화시키는 알고리즘이다^[5]. 평균 홉 거리를 최소화시키는 것은 자동적으로 증가하는 트래픽량을 효율적으로 전송할 수 있다는 것이다. Z. Zhang와 A. Acampora는 회선교환망에서의 라우팅

과 파장할당(RWA : routing and wavelength assignment)의 직관적인 알고리즘을 제안하였다^[10]. 다음 파장을 사용하기 전에 전송되는 트래픽을 감소시키기 위해서 가능한 모든 광경로에 한 파장으로 할당하는 알고리즘이다. R. Ramaswami와 K. N. Shivarajan은 기존의 RWA를 적용시켰을 때 전송되는 트래픽량의 상위 경계치(upper bound)를 유도하였다. 여기서 구한 식은 많은 파장수를 사용할 때만이 유용하다는 단점을 갖고 있다. D. Banerjee와 B. Mukherjee는 논리적인 토폴로지 설계문제중의 하나로 광경로의 동적 라우팅문제를 기술하고 있다.

일반적으로 최적의 논리적인 토폴로지 설계는 NP-hard^[8] 특성을 가지는 문제로 알려져 있으며, 많은 경우 신속한 구성을 위하여 최적에 가까운 특성을 나타내도록 직관적인 방법(huristic Approach)를 적용한다. 본 논문에서는 근사적인 해결책인 직관적 알고리즘(heuristic algorithm)을 구현하여 논리적인 토폴로지를 설계하고, 사용된 휴리스틱 알고리즘이 효과적이고 효율적임을 분석하였다.

II. 논리적 토폴로지 설계문제

1. 광경로 설정문제

논리적 토폴로지를 설계할 때, 파장할당은 사용되는 파장수의 제한 때문에 요구된 광경로에 대해서 효율적으로 할당해야 한다. 파장의 라우팅 경로는 같은 파장으로 할당한다. 하나의 광경로를 설정하기 위해서, 파장 연속성(wavelength-continuity) 제약이 없을 때와 비교할 때, 같은 파장으로 설정하는 것은 대역폭 손실을 의미한다. 다시 말해서 이 손실은 파장수의 제한 때문에 주어진 광경로의 집합을 성공적으로 설정하는데 필요한 파장수 증가와 광경로 블로킹율(blocking rate)의 증가를 의미한다. 그러므로 손실을 최소화하는 것은 제한된 물리적인 조건아래에서 효율적인 파장라우팅과 파장 할당 방법을 통한 효과적인 광경로 설정을 필요로 한다.

광경로 설정 알고리즘 설계는 광경로 최적화 문제의 복잡성을 분석해야 한다^[8]. 근본적인 문제는 광경로사이에서의 충돌을 들 수 있다. 즉, 주어진 한 링크상에서 하나의 광경로보다 많은 경로가 동시에 같은 파장으로 할당된다면 이 때 충돌이 발생하게 된다. 그러므로 충돌문제의 해결은 요구된 광경로 집합에 대한 파장 수

의 최소화 또는 광경로 설정 요구수에 대한 광경로 블로킹율의 최소화이다.

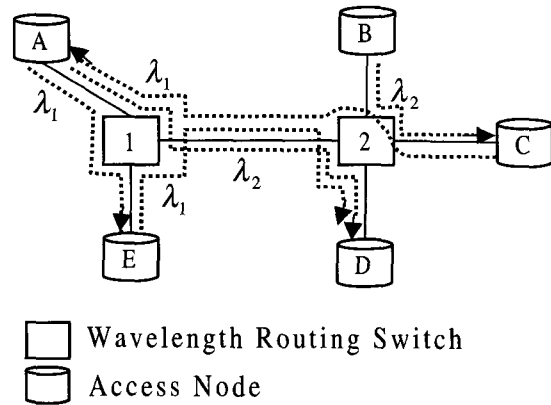


그림 3. WDM 전광네트워크에서 광경로 라우팅
Fig. 3. Lightpath routing in a WDM all-optical network.

그림 3은 WDM 전광네트워크에서 광경로 라우팅 예이다. 두 종단간의 노드에 의해서 형성된 광경로들은 논리적 토폴로지를 형성하게 된다. 요구된 한 광경로 집합이 주어질 때, A에서 E로 형성되는 광경로와 노드 A에서 노드 D로 형성되는 광경로는 물리적인 광섬유 링크를 A에서 출력링크로 공유하기 때문에 각각 다른 파장 λ_1 과 λ_2 로 할당해야만 한다. 또 파장라우팅 스위치 1과 2사이에서 노드 E에서 D로 가는 광경로가 이미 파장 λ_1 로 할당되어 있다면 노드 A에서 D로 가는 광경로는 파장 λ_2 로 할당해야 한다. 이는 서로 다른 광경로가 하나의 광섬유링크를 공유하고 있다면 서로 다른 파장을 할당해야 한다.

2. 최적화 공식유도

본 절에서는 앞에 설명한 광경로 설정문제를 근거로 WDM 전광네트워크의 논리적 토폴로지 최적화 공식을 소개한다^[12]. 다음은 광경로들의 물리적 라우팅을 위한 흐름제어와 논리적 토폴로지의 트래픽 흐름에 관한 원리들을 공식으로 유도한다.

(1) 일반적인 문제

우선, 주어진 물리적인 토폴로지에 원하는 논리적 토폴로지를 적용시키는 문제는 다음과 같은 일반적인 문제를 갖는다. 가중치(weight)를 갖는 양방향성의 그래프인 $G_p = (V, E_p)$ 는 물리적 토폴로지를 나타낸다. 여기서 V 는 네트워크 노드들의 집합이고, E_p 는 노드들을

연결하는 링크들의 집합이다. 물리적 토폴로지의 링크는 방향성이 없다. 즉, 각 링크는 두 개의 광섬유 또는 같은 광섬유에 다중화 방법을 이용해 두 개의 채널로 구성됨을 의미한다. 링크들은 노드간의 물리적인 거리 등을 고려하여 가중치를 갖는다. 네트워크 노드 i 는 $D_p(i) \times D_p(i)$ 파장라우팅 스위치(WRS)를 갖고 있다고 가정한다. 여기서 $D_p(i)$ 의 의미는 노드 i 의 입출력 포트의 수는 노드 i 에서 originating과 terminating 되는 광섬유 링크수와 같음을 나타낸다. M 은 각각의 광섬유 링크로 전송되는 파장수를 나타낸다. $N \times N$ 트래픽 행렬에서 N 은 네트워크 노드수를 의미한다. 트래픽 행렬의 (ij) 번째 요소는 노드 i 에서 노드 j 로 가는 평균 트래픽량을 나타낸다. 전송되는 트래픽 특성은 비대칭(asymmetric)이다. 즉, 같은 노드간의 입력되고 출력되는 트래픽량은 서로 다르다. 각각 노드의 송수신기 수는 각 노드의 indegree, outdegree만큼의 수를 갖는다. 논리적인 토폴로지 노드간의 링크는 중간에 전자적인 처리를 갖지 않으며 지연이 없는 전광경로(all-optical lightpath)를 의미한다. WDM 전광네트워크의 논리적 토폴로지 설계의 최적화의 목적함수는 다양하게 선택할 수 있다. 그 중에서 평균패킷지연을 최소화 또는 네트워크의 처리량 극대화 등을 목적으로 최적화 방법이 있고, 또한 평균 홉 거리의 최소화가 있다. 그 중에 평균 패킷 지연(average packet delay)을 최소화와 네트워크의 처리량을 최대화하는 목적함수(objective function)를 다음 절에서 기술한다.

(2) 표기 및 변수들

다음은 수식유도를 위한 표기, 주어진 값, 그리고 변수들이다. s, d 는 패킷의 소스(source)이고 목적지(destination)를 의미하고, i, j 는 광경로의 originating과 terminating을 표시한다. m, n 은 광경로가 포함하고 있는 물리적인 광섬유 링크의 종단을 나타낸다. N 은 네트워크 노드 수이고, W 는 광섬유가 전송할 수 있는 최대 파장수를 나타낸다. 물리적인 토폴로지 P_{mn} 은 노드 m 과 노드 n 사이에서의 광섬유 링크 수를 가리킨다. 만약 $P_{mn} = P_{nm} = 1$ 이면 직접 연결된 광섬유의 수가 하나임을 가르키고, 그 외에는 $P_{mn} = P_{nm} = 0$ 이다. $P_{mn} = P_{nm}$ 의 의미는 서로 다른 방향으로 두개의 노드를 연결하는 광섬유 수는 같음을 나타낸다. d_{mn} 은 노드 m 과 n 사이의 물리적인 광섬유의 거리를 나타내는 거리행렬(distance matrix)이다. T_i, R_i 는 각각 노드 i 의 송수

신기 수를 나타낸다. λ_{sd} 는 s, d 간의 평균 트래픽량을 나타낸다. C 는 파장채널의 전송용량을 나타낸다. 다음은 논리적인 토폴로지의 변수들이다. V_{ij} 는 논리적 토폴로지 노드 i 에서 j 까지의 광경로의 수를 나타낸다. $V_{ij} = 1$ 은 노드 i 와 j 사이에서 하나의 광경로를 갖고 있음을 나타내고 $V_{ij} = 0$ 은 그 외의 경우이다. 여기서 항상 $V_{ij} = 1$ 이면 $V_{ji} = 1$ 이 되는 것은 아니다. 트래픽 라우팅 변수 λ_{sd}^{ij} 는 노드 s 에서 노드 d 까지 전송되는 트래픽량이다. λ_{sd}^{ij} 는 가상링크 V_{ij} 를 포함하고 있다. 물리적인 토폴로지의 경로 변수 p_{mn}^{ij} 은 광섬유 링크 P_{mn} 이 가상링크 V_{ij} 에 대한 광경로의 유무를 나타낸다. $p_{mn}^{ij} = 1$ 은 광경로가 P_{mn} 을 포함하고 있다는 것을 나타낸다. $p_{mn}^{ij} = 0$ 은 그 외의 경우를 나타낸다. 파장을 할당하는 변수 c_k^{ij} 는 originating 노드 i 에서 terminating 노드 j 로 형성된 광경로를 k 로 할당되었음을 나타낸다. 여기서 k 는 $1, 2, \dots, M$ 이다. 예를 들어 $c_k^{ij} = 1$ 은 k 로 할당되었음을 나타내고 값이 0은 그 외의 경우를 나타낸다.

(3) 제약조건

다음 (1)-(14)식은 제약조건들을 설명한다.

$$\sum_j V_{ij} \leq T_i \quad (T_i \geq 1) \forall i \quad (1)$$

$$\sum_j V_{ij} \leq R_j \quad (R_j \geq 1) \forall j \quad (2)$$

식 (1), (2)는 한 노드에서 originating과 terminating 하는 광경로 수는 각각 노드의 indegree, outdegree와 같음을 나타낸다.

물리적인 형태에서 라우트 변수 p_{mn}^{ij} 은 다음과 같다.

$$p_{mn}^{ij} \leq P_{mn} \quad (3)$$

$$p_{mn}^{ij} \leq V_{mn} \quad (4)$$

$$\sum_m p_{mk}^{ij} = \sum_n p_{kn}^{ij} \quad \text{if } k \neq i, j \quad (5)$$

$$\sum_n p_{in}^{ij} = V_{ij} \quad (6)$$

$$\sum_m p_{mj}^{ij} = V_{ij} \quad (7)$$

식 (3), (4)는 한 광섬유 링크에 하나의 광경로가 있을 때, p_{mn}^{ij} 에 대한 조건식을 나타낸다. 식 (5), (6), (7)은 광경로의 origin에서 termination까지의 라우팅에 대한 조건식이다.

다음 식은 논리적 토폴로지 트래픽 변수 λ_{ij}^{sd} 에 대한 조건을 나타낸다.

$$\lambda_{ij}^{sd} \geq 0 \tag{8}$$

$$\sum_j \lambda_{sj}^{sd} = \lambda_{sd} \tag{9}$$

$$\sum_r \lambda_{id}^{sd} = \lambda_{sd} \tag{10}$$

$$\sum_r \lambda_{ik}^{sd} = \sum_j \lambda_{kj}^{sd} \text{ if } k \neq s, d \tag{11}$$

$$\sum_{s,d} \lambda_{ij}^{sd} = V_{sd} * C \tag{12}$$

식 (8)에서 (12)는 논리적 토폴로지를 적용한 후에 패킷 트래픽의 라우팅 조건과 전송되는 트래픽량은 한 채널의 전송용량을 초과할 수 없음을 나타낸다.

$$\sum_k c_k^{ij} = V_{ij} \tag{13}$$

$$\sum_{m,n} p_{mn}^{ij} \cdot c_k^{ij} \leq 1 \quad \forall m,n,k \quad V_{ij} \tag{14}$$

식 (13)은 하나의 광경로는 단지 하나의 칼라(color)를 갖는다는 것을 나타내고, 식 (14)는 서로 다른 광경로에서 사용된 칼라들은 각각 하나의 물리적인 링크를 갖는다는 것을 나타낸다.

(4) 목적함수

다음은 최적화 목적함수이다. 식 (15)는 네트워크 트래픽 지연의 최소화함수를 나타내고, 식 (16)은 한 링크 상에서 최대 플로우(flow)를 최소화하는 함수를 나타낸다.

$$\sum_{ij} \left[\sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd} \left(\sum_{mn} p_{mn}^{ij} d_{mn} + \frac{1}{\left[C - \sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd} \right]} \right) \right] \tag{15}$$

$$\min \left[\max \left(\sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd} \right) \right] \equiv \max \frac{C}{\left[\max \left(\sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd} \right) \right]} \quad \forall i,j \tag{16}$$

식 (15)의 $\sum_{mn} p_{mn}^{ij} d_{mn}$ 은 링크 mn에서 광경로 ij를 형성 하는데 필요한 전파지연(propagation delay)을 나타낸다. $\frac{1}{\left[C - \sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd} \right]}$ 은 광경로 ij의 큐잉(queueing)과 패킷 전송지연(packet transmission delay)으로 발생하는 지연을 나타낸다. 식 (16)은 광경로를 통해 전송하는 트래픽의 최대량을 최소화함을 나타낸다. 두 목적함수를 보듯이 비선형함수이며 이의 최적화 문제는 NP-hard라는 것을 알 수 있다. 따라서, 최적의 해를 구한다는 것은 네트워크 규모의 증가와 함께 많은 제약조건들로 인하여 상당한 계산량을 필요로 한다. 이에 따라

빠른 시간내에 최적화에 근접하는 논리적인 토폴로지 설계를 수행하는 휴리스틱(heuristic) 알고리즘이 많이 연구되고 있다.

III. 휴리스틱 알고리즘

앞절에서 설명했듯이, 파장할당과 라우팅의 최적해를 다양한 제약조건하에서 직접적으로 구하는 것은, 네트워크 규모가 커지는 경우에는 상당한 시간이 필요하고 적시에 네트워크를 재구성하는 데 어려움을 겪을 수 있다. 그러므로 논리적 토폴로지 최적화 설계문제는 근사적 해결책인 휴리스틱 알고리즘에 의해서 해결될 수 있다. 본 논문은 논리적인 토폴로지 설계를 위해서 두 개의 휴리스틱 알고리즘을 구현하였다. 다음은 두 알고리즘에서 고려한 사항과 수행절차를 설명한다.

1. MaxSingleHop[MSH] 알고리즘

휴리스틱 알고리즘 MSH는 앞절에서 설명한 물리적인 제약조건을 만족한다. 트래픽 요구에 대한 광경로를 설정할 때, MSH는 트래픽량이 가장 큰 소스/목적지간(s/d)을 우선적으로 설정하는 알고리즘이다. 각각 노드에서 발생하는 트래픽들 중에서 가장 큰 트래픽은 같은 전송 조건아래에서 네트워크 전체의 처리율에 상대적

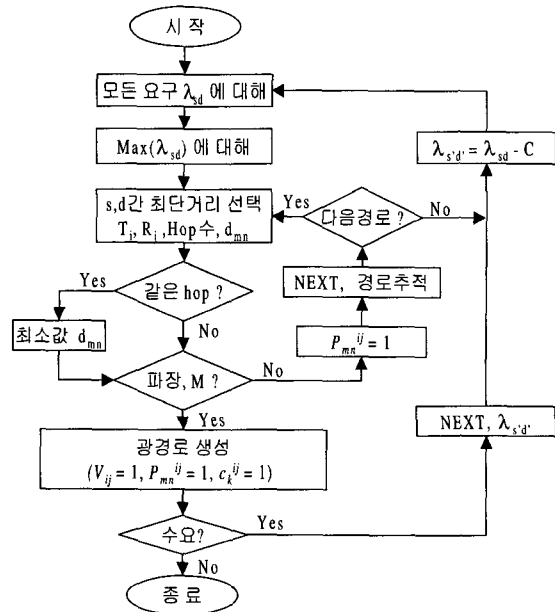


그림 4. MSH 알고리즘 구현 순서도
Fig. 4. Implementation flow-chart of MSH algorithm.

으로 많은 영향을 갖는다. 가장 큰 트래픽의 우선적 처리는 네트워크 전체의 평균지연 최소화 또는 처리율을 향상시킨다.

그림 4는 휴리스틱 알고리즘 MSH의 구현 순서도이다. 우선 주어진 트래픽에서 가장 큰 트래픽(MAX(λ_{sd}))을 찾는다. 그리고 가장 큰 트래픽을 갖는 소스(s)와 목적지(d)사이의 최단거리의 물리적 경로를 추적하여 광경로를 설정한다. 여기서, 최단거리의 물리적 경로는 s와 d에서 사용가능한 송수신기의 여유가 있고, 광섬유 링크 수가 가장 작고, 물리적 광섬유의 거리(d_{mn})가 최단거리의 경로이다. 광경로는 최단거리를 갖는 경로에 주어진 사용 가능한 과장을 할당하여 설정한다. 광경로를 설정한 후에 이미 할당된 송수신기, 과장, 그리고 트래픽 행렬, 물리적 경로에 대한 정보들은 새로이 갱신하고 기록한다. 다음의 광경로 설정은 이미 설정된 광경로들과 충돌이 발생하지 않도록 갱신된 제약조건을 따라 설정한다. 반복적인 과정에 의해서 요구되는 모든 트래픽 행렬에 대해서 광경로를 설정한다. 알고리즘을 수행한 다음, 주어진 트래픽 행렬에 대응하여 요구되는 광경로를 설정하지 못했을 경우는 물리적인 제약조건 때문에 발생하는 광경로 블로킹(blocking)이라 한다.

2. MaxMultiHop[MMH] 알고리즘

패킷 스위치 망에서 패킷을 전송시에 소스/목적지간의 물리적인 링크의 수가 많으면(hopping의 수가 많으면) 그만큼 망의 지연을 초래할 것이다. 따라서, 광경로 설정시에 가장 hopping수가 많은 소스/목적지간(s/d)에 우선적으로 광경로를 설정하여 one-hop으로 처리함으로써 네트워크 전체의 지연을 감소시킨다.

그림 5는 MMH 알고리즘의 구현 순서도이다. 순서도에서 보여주듯이, 두 종단 노드사이에서 물리적인 광섬유 링크수를 H_{sd} 라 하고, λ_{sd} 를 트래픽량이라 한다. 다음은 $\lambda_{sd} \times H_{sd}$ 의 값을 계산하여 가장 큰 값에 우선적으로 광경로를 설정한다. MSH에서와 마찬가지로 설정된 광경로와 관련된 정보들을 갱신, 기록하여 다음 광경로 설정하는데 제약조건에 위배되지 않도록 한다. 이 알고리즘의 의해서 이루어진 논리적 토폴로지는 물리적 토폴로지에서 우선적으로 가장 많은 hopping수를 갖는 소스와 목적지간에 광경로를 one-hop 처리함으로써 망 전체의 패킷지연을 최소화 하고자 하는 것이다.

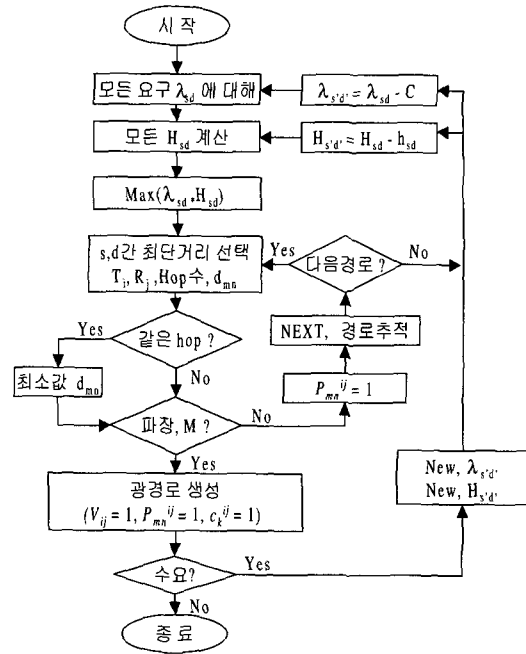


그림 5. MMH 알고리즘 구현 순서도
Fig. 5. Implementation flow-chart of MMH algorithm.

IV. 알고리즘 적용 및 결과 분석

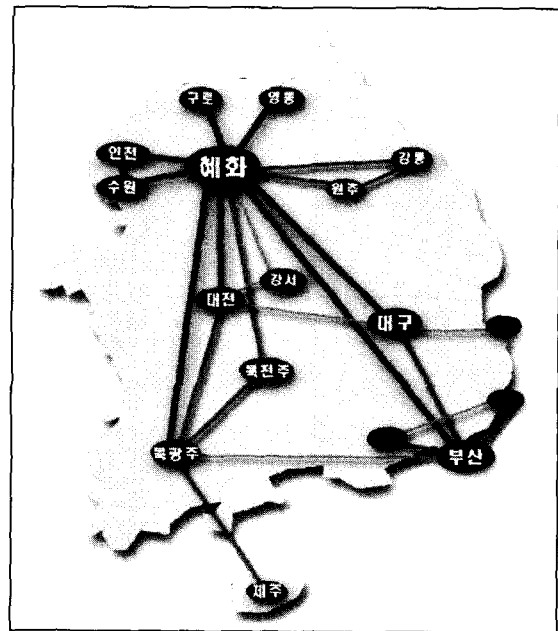


그림 6. 휴리스틱 알고리즘 적용모델 : KORNET 전국 중계망도
Fig. 6. Physical topology model : KORNET.

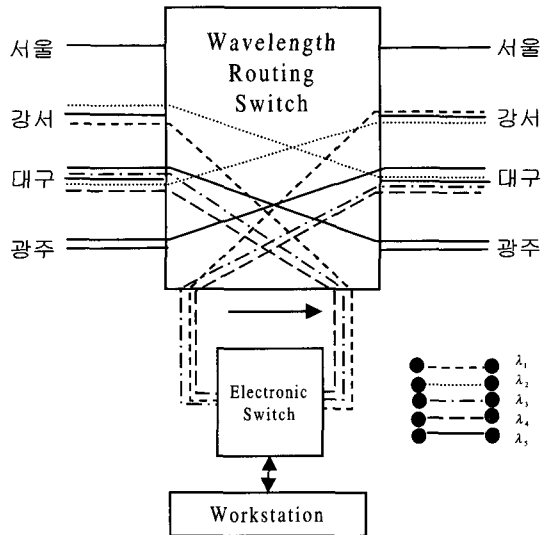


그림 7. 노드 '대전'의 파장라우팅 스위치 구조.
Fig. 7. Node 'Daejeon' wavelength routing switch architecture.

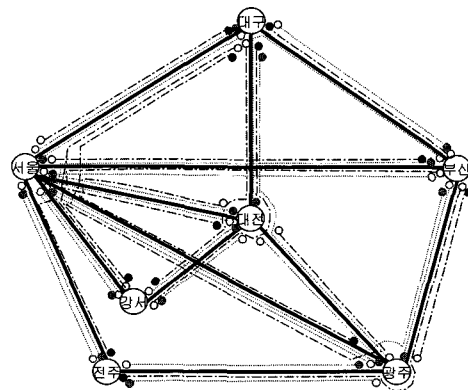
두 알고리즘을 적용하여 형성된 논리적 토폴로지의 특성을 분석하기 위해서 그림 6에 보인 한국통신 전국 중계망(KORNET)을 물리망으로 고려하였다. KORNET은 WDM 전광네트워크의 구조를 갖는다고 가정한다. 트래픽 모델은 KORNET평균 트래픽량을 조사하여 이를 기준으로 장래에 예상되는 트래픽을 예측하여 사용하였다. 여기서 트래픽 특성은 일정하다(uniform)고 가정한다. 물리적인 경로의 라우팅은 노드간 광섬유의 거리와 광섬유 링크 수를 고려하여 최단경로로 라우팅하였다. 그림 7은 여기서 적용한 WDM 전광네트워크 노드 '대전'의 파장 라우팅 스위치 구조를 보여준다^[11]. 라우팅 노드는 indegree, outdegree 만큼의 송수신기를 갖는 WRS에 의해서 노드로 입력된 파장채널(wavelength channel)을 원하는 광섬유 출력링크로 스위칭한다.

표 1과 그림 8은 휴리스틱 알고리즘의 결과로써 설정된 광경로와 형성된 논리적인 토폴로지의 예를 보여준다. 표 1은 파장을 2개 사용했을 때 MSH와 MMH에 의해 설정된 광경로들이다. 같은 조건아래 MSH에 의한 설정된 광경로의 수는 MMH보다 많음을 볼 수 있다. 예상한 바와 같이 MMH는 많은 광섬유 링크수를 갖는 경로에 대해서 우선적으로 광경로를 설정하기 때문에 다음의 광경로 설정을 위한 경로들이 MSH보다 작아지기 때문이다. 즉 광경로가 포함하는 광섬유 링크 수가 작을수록 더 많은 광경로를 설정할 수 있다. 그림 8은 표 1에서 두 개의 파장 λ_0 , λ_1 에 의해서 설정된

광경로들을 물리적인 토폴로지에 도식한 논리적인 토폴로지의 예이다. 광경로 설정에 의한 논리적 토폴로지는 네트워크 사용이득 측면에서 보았을 때 물리적인 망보다 효율적이다.

표 1. 휴리스틱 알고리즘에 의한 논리적 토폴로지 형성(요구수 = 43, W = 2).
Table 1. Wavelength assignment of heuristic algorithm(requests=43, W=2).

M S H		M M H	
광경로	파장	광경로	파장
서울-대구	0	서울-대구	0
서울-대전	0	서울-대구	1
서울-광주	0	서울-대전-대구	0
서울-전주	0	서울-대전-대구	1
강서-대전	0	서울-부산-대구	0
대구-서울	0	강서-서울-부산	1
부산-대구-대전	0	서울-강서-대전-대구	0
부산-광주	0	강서-대전-광주-부산	1
강서-서울-부산	0	서울-광주-대전-대구	0
강서-대전-대구	1	서울-광주-대전	1
서울-부산	1	서울-전주-광주	0
서울-강서	0	부산-대구-대전	1
대전-서울	0	서울-전주-광주-대전	1
부산-대구	1	부산-광주-전주	0
부산-광주-전주	1	부산-광주	1
광주-서울	0	부산-서울-강서	1
대구-대전-강서	1	대구-대전-강서	0
강서-서울-전주	1	대구-부산-서울-강서	0
부산-서울-강서	1	대구-서울	0
서울-대구	1	광주-전주-서울-대구	1
전주-서울	0	대구-서울	1
광주-대전-대구	0	대구-부산	0
광주-전주	0	대전-서울	0
대구-서울-대전	1	대전-광주-부산	0
대구-부산	0	전주-서울	0
대전-광주-부산	0	광주-서울	1
전주-광주	0	대전-서울	1
광주-부산	1	광주-서울	1
대전-강서	0	대전-강서	1
대전-광주-서울-대구	1	강서-서울	0
부산-서울	0		
대전-서울-광주	1		



(a)

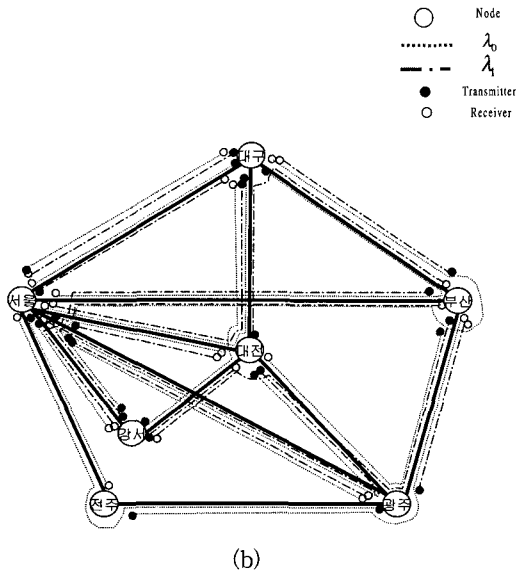


그림 8. 휴리스틱 알고리즘을 적용한 논리적 토폴로지에 : (a) MSH, (b) MMH

Fig. 8. Examples of logical topologies with using heuristic algorithms : (a) MSH, (b) MMH.

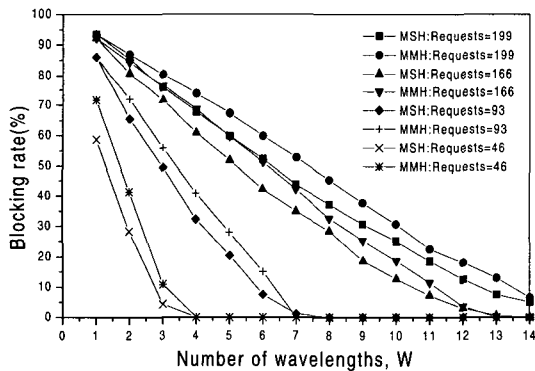


그림 9. 파장수 증가에 따른 블로킹율(blocking rate).
Fig. 9. Blocking rate versus increasing number of wavelength.

그림 9에서 그림 14는 두 개의 휴리스틱 알고리즘(MSH, MMH)의 특성을 보여준다. 그림 9는 사용파장수의 증가에 따른 블로킹율을 보여준다. 같은 광경로의 요구수(requests)에 대해서 설정되는 광경로의 수는 MSH가 MMH보다 많고 평균적인 블로킹율은 5.8%만큼 더 작다. 트래픽 수요에 대한 광경로 요구수가 46일 때 제한된 조건아래에서 요구된 광경로를 모두 설정하기 위해 사용해야 할 파장은 4개이다. 즉, 이 때의 블로킹율은 0%이다. 그림 10은 광경로 요구수에 따른 블로킹율을 나타낸다. 사용되는 파장의 수를 각각 2, 6개일

때, 광경로 요구수가 증가함에 따라서 각각의 설정되는 광경로 수를 보여준다. 여기서 알고리즘 MSH가 MMH보다 설정된 광경로 수가 작다. 파장이 6개일 때, 82개까지 요구된 광경로들을 블로킹 없이 설정 가능하다.

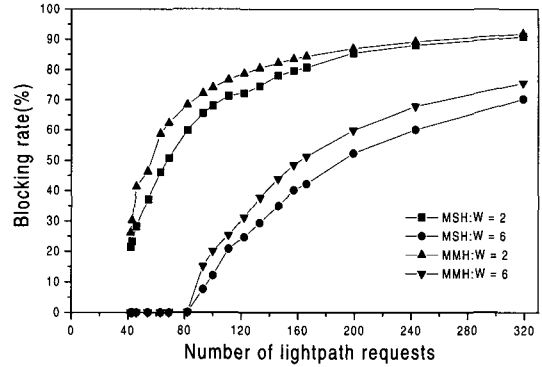


그림 10. 광경로 요구수에 따른 블로킹율(blocking rate)

Fig. 10. Blocking rate versus increasing number of lightpath requests.

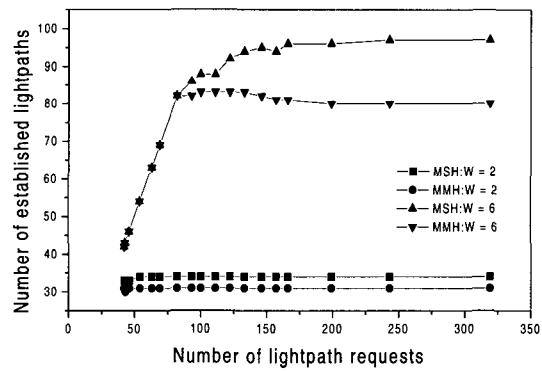


그림 11. 다른 광경로 요구수에 대한 설정된 광경로수
Fig. 11. The number of established lightpaths, for different number of lightpath requests.

그림 11은 요구된 광경로수에 대한 설정된 광경로수를 보여준다. 각각 알고리즘에서 사용한 파장을 2개와 6개이다. 일정하게 증가하는 장래의 트래픽 수요에 대응하여 요구되는 광경로 수를 증가시켰을 때, 설정되는 광경로 수는 MSH가 더 많음을 보여준다. 여기서 설정된 광경로의 수가 많으면 많을수록 망 처리량의 증가를 의미한다. 처리량의 증가는 트래픽 수요증가에 따른 더 많은 광경로 설정과 요구되는 광경로 수가 증가하기 때문이다. 그림 12는 주어진 트래픽 수요에 대응하는 요구된 광경로들을 모두 설정한 후에 파장의 증가

에 관계없이 물리적인 토폴로지상에서 설정되는 광경로의 수가 일정함을 보여준다.

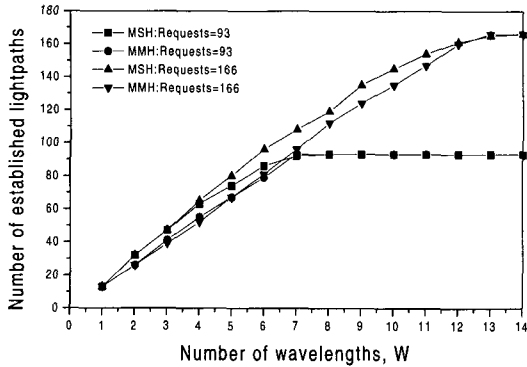


그림 12. 다른 파장수에 대한 설정된 광경로수
Fig. 12. The number of established lightpaths, for different number of wavelength.

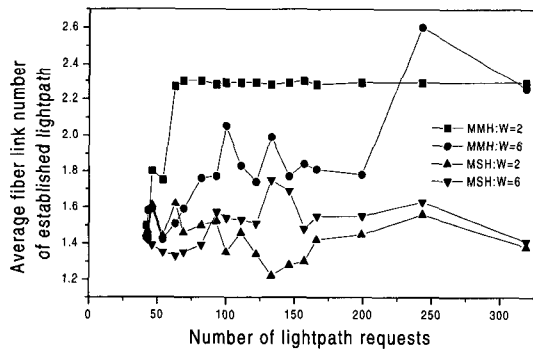


그림 13. 설정된 광경로의 평균적인 광섬유 링크 수
Fig. 13. Average fiber link number of established lightpath, for different number of lightpath requests.

그림 13은 트래픽 수요로부터 요구된 광경로에 대해서 설정된 광경로들이 갖는 물리적인 광섬유 링크수의 값을 평균으로 나타내고 있다. 예상한 바와 같이 광섬유 링크수는 알고리즘 MSH에 의한 것보다 MMH가 더 많음을 볼 수 있다. 이를 거꾸로 해석하면, 실제로 설정된 논리망에서 패킷을 라우팅할 때, MMH로 만들어진 논리망의 경우가 평균적으로 hopping을 덜 하게 되어 망의 지연율이 개선된다는 의미이다.

V. 결론

본 논문에서는 논리적 토폴로지 설계의 근사법인 두

개의 휴리스틱 알고리즘을 구현하였다. 설계된 논리망의 효율성과 두 알고리즘의 특성을 비교하였다. 휴리스틱 알고리즘 MSH는 제일 큰 트래픽량을 가지는 경로부터 우선적으로 광경로로 할당함으로써 최적화에 근접하는 논리적 토폴로지를 구현하고자 하였고, 휴리스틱 알고리즘 MMH는 전송될 트래픽이 라우팅되는 경로들중에 많은 hopping수를 갖는 경로에 우선적으로 광경로로 할당하여 망의 지연을 감소시키려 했다. 두 알고리즘을 통해 물리적 토폴로지에서의 논리적 토폴로지를 신속히 구할 수 있었고 각각의 알고리즘의 특성을 비교해 보았다. 각각 사용 가능한 파장수 증가와 망에서 트래픽 수요에 따른 요구되는 광경로 수의 증가에 대한 특성을 알아 보았다. 설정된 광경로들에 의해서 형성된 논리적인 토폴로지는 주어진 물리적인 망을 효율적으로 사용할 수 있다. 또한 두 알고리즘의 특성으로 파장수 증가에 따라서 블로킹 확률은 감소하고, 요구된 광경로의 수의 증가에 따라서 블로킹율은 증가한다. 블로킹율 측면에서 MSH가 MMH에 비해서 낮은 것은 설정 가능한 광경로 수가 많다는 것을 의미한다. 그리고 설정된 광경로들의 평균적 광섬유 링크수가 MSH보다 MMH가 더 많다. 패킷 스위치 망에 적용하였을 때 MMH에 의해 설정된 논리적 토폴로지는 실제 패킷 전송시에 작은 hopping수에 따른 망 전체의 지연을 감소시킬 수 있다.

WDM 전광네트워크의 논리적 토폴로지 설계는 망의 효과적인 사용을 위해서 앞으로 지속적인 연구가 필요하다. 특히, 실제 네트워크에 적용할 수 있는 최적 라우팅과 파장할당기법의 휴리스틱 알고리즘 개발이 필요하다.

참고 문헌

- [1] "Special Issue on WDM Networks", *Journal of High-Speed Networks*, vol. 4, no. 1/2, 1995.
- [2] "Special Issue on Optical Networks", *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 14, June 1996.
- [3] B. Mukherjee, *Optical Communication Networks*, McGraw-Hill, New York, 1997.
- [4] A. Watanabe, S. Okamoto, and K. Sato, "Robust IP Backbone Network Utilizing WDM Optical Paths", *IEICE Trans. Electron.*, vol.

- E82-C, No. 8, pp. 1381-1386, August 1999.
- [5] R. Ramaswami and K. N. Shivarajan, "Design of Logical Topologies for Wavelength Routed Optical Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, n. 6, pp.840-851, June 1996.
- [6] B. Mukherjee, "WDM-Bases Local Lightwave Networks : Part I : Single-Hop Systems, Part II : Multi-Hop Systems", *IEEE Network*, pp. 12-27, May 1992 and pp. 20-32, July 1992
- [7] D. Banerjee and B. Mukherjee, "A Practical Approaches for Routing and Wavelength Assignment in Large All-Optical Wavelength-Routed Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, June 1996.
- [8] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Kami, "Lightpath Communications : An Approach to High Bandwidth Optical WAN's", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, no. 7, pp. 1171-1182, July 1992.
- [9] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightnets : Topologies for High-Speed Optical Networks", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, no. 5/6, pp. 951-961, May/June 1993.
- [10] Z. Zhang and A. Acampora, "A Heuristic Wavelength Assignment Algorithm for Multihop WDM Networks with Wavelength Routing and Wavelength Reuse", *Proc IEEE Infocom '94*, pp. 534-543, Tronto, June 1994.
- [11] R. Ramaswami and K. N. Shivarajan, "Optimal Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks", *Proc IEEE Infocom '94*, pp. 970-979, Tronto, June 1994.
- [12] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee, "Some Principles for Designing a Wide-Area WDM Optical Networks", *IEEE Transactions on Networking*, vol. 4, no. 5, pp. 684-695, October 1996.
- [13] D. Banerjee and B. Mukherjee, "Wavelength Routed Optical Networks : Linear Formulation, Resource Budgeting Tradeoffs, and Reconfiguration Study", *IEEE Infocom of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 9, pp. 1636-1646, September 1997.
- [14] A. Ganz and X. Wang. "Efficient Algorithm for Virtual Topology Design in Multihop Lightwave Networks", *ACM/IEEE Transactions on Networking*, vol. 2, no. 3, pp. 217-225, June 1994.
- [15] S. Banerjee and C. Chen, "Design of Wavelength Routed Optical Networks for Packet Switched Traffic", *Proc IEEE ICC '96*, pp. 444-448, Dallas, June 1996.
- [16] S. Banerjee and C. Chen, "Design of Wavelength Routed Optical Networks for Circuit Switched Traffic", *Proc IEEE Globecom '96*, London, November 1996.
- [17] C. Chen and S. Banerjee, "A New Model for Optimal Routing and Wavelength Assignment in Wavelength Division Multiplexed Optical Networks", *Proc IEEE Infocom '96*, pp. 164-171, San Francisco, April 1996.

저 자 소 개



金 基 源(正會員)

1999년 광운대학교 전자통신공학과 (공학사). 2001년 광운대학교 전자통신공학과(공학석사). 2001년 2월~현재 한국전자통신연구원 네트워크 연구소 광통신연구부 연구원. [주관심 분야] WDM 광전송시스템 제어

(OAM) 및 전광네트워크 설계



鄭 榮 哲(正會員)

1981년 서울대학교 전자공학과(공학사). 1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1992년 Electrical and Computer Engineering(박사), University of California, Santa Barbara(UCSB).

1981년~1986년 금성전선 기술연구소 1987년~1988년 Optoelectronics Technology Center(UCSB) 연구원. 1993년~현재 광운대학교 전자공학부/전자통신공학과 부교수. [주관심분야] 광통신용소자 및 광통신시스템/네트워크