

# 비대칭 이중층 셔플넷 구조를 갖는 WDM 네트워크의 성능분석 및 채널 공유

정희원 여인영\*, 이승원\*\*, 신서용\*

## Performance Analysis and Channel Sharing of Asymmetric Bilayered ShuffleNet WDM Network

Inyoung Yeo\*, Seungwon Lee\*\*, Seoyong Shin\* *Regular Members*

### 요약

다중홉 네트워크는 광섬유를 기반으로 하는 근거리 광통신 시스템으로 광의 무한한 대역폭을 효과적으로 활용하기 위해 다수의 파장가변 광송수신기를 사용하는 것 대신 WDM기술을 사용한다. 본 논문에서는 다중홉 방식의 WDM 네트워크 기술로서 새로운 셔플넷 방식인 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지를 소개한다. 1Gb/s의 통신 시스템을 기준으로, 본 연구에서 새롭게 제안한 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지의 성능을 평균 홉수, 수율, 및 시간지연과 같은 일반적인 네트워크 파라미터를 중심으로 기존의 발표된 토폴로지들과 비교하였다. 비교 분석 결과, 새롭게 제안한 비대칭 이중층 토폴로지의 성능이 기존의 것들에 비해 더 우수함이 증명되었다. 또한, 비대칭 이중층 토폴로지를 구현함에 있어 요구되는 하드웨어의 양을 획기적으로 감소시킬수 있는 WDM 채널 공유 방식을 새롭게 제안하였다. 새로운 공유 방식을 사용하면, 예를 들어 (2, 3) 셔플넷 토폴로지 시스템에서 필요로 하는 파장의 개수가 96개에서 4개로 획기적으로 줄어들게 된다.

### ABSTRACT

Multiphop lightwave networks are the optical-fiber based local communication systems that employ WDM(Wavelength Division Multiplexing) technology to fully use the enormous fiber bandwidth without requiring any tunable transceivers. In this paper, we introduce a novel ShuffleNet topology, asymmetric bilayered ShuffleNet(ABS) topology as a multiphop WDM network technique. For 1Gb/s transmission system, we compared ABS topology with previously reported ones in terms of common network parameters such as average number of hops, throughput, time delay, and network power function. Through the analysis, the performance of ABS topology was proven to be superior to the existing ones. To decrease the amount of hardware required for implementing ABS system, we also proposed a new WDM channel sharing scheme. For (2, 3) ShuffleNet topology system, the number of wavelengths needed in the system can be reduced dramatically from 96 to 4 by using new scheme.

\* 명지대학교 정보통신공학과 광통신 연구실 (in02@wh.myongji.ac.kr , sshin@wh.myongji.ac.kr)

\*\* 동남보건대학 안경광학과 (swlec@dongnam.ac.kr)

논문번호: 00109-0323 접수일자: 2000년 3월 23일

※ 본 연구는 광주과학기술원 초고속 광네트워크 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의한 것임.

※ 본 연구의 일부는 또한 정보통신부의 정보통신 우수시범학교 지원사업에 의하여 수행된 것임.

## I. 서론

전화가 발명된 이후로 시작된 통신 서비스는 전자장비의 빠른 개발로 인해 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 또한 1990년대에 들어서면서 인터넷 및 멀티미디어 서비스 등의 급성장은 광대역(broadband) 전송을 요구 하고있다. 기존의 동축 케이블로는 방대한 양의 정보를 처리하기 어려우므로, 20THz~30THz의 넓은 대역폭과 0.2dB/km의 저손실 특성을 갖는 광섬유를 이용한 광 통신망이 광대역 서비스를 위해서 필수적이다<sup>[1][4]</sup>. 광 통신망을 구성하는데 있어서 한 가지 문제점은 광섬유의 저손실 대역폭은 수십 THz에 이르는 반면에, 전자소자의 신호처리 속도가 약 10GHz로 제한되기 때문에 사용 가능한 대역폭의 0.1% 정도밖에 사용할 수 없다는 점이다. 이런 전자소자에 의한 신호처리의 병목 현상을 줄이고 광섬유의 큰 대역폭을 효율적으로 활용하기 위한 광 다중화 기술이 연구되고 있다. 광 다중화 기술을 크게 세 가지로 구분하면, 광학적으로 짧은 펄스를 만들어 이를 다중화 하는 방식인 광 시분할 다중방식(OTDM : Optical Time Division Multi-plexing), 여러 가지 다른 파장은 묶어 한 개의 광섬유를 통해 전송하는 방식인 파장 분할 다중방식(WDM : wavelength division multiplexing), 광 부호분할 다중방식(OCDM : optical code division multiplexing)이 있다. 이 중에서 가장 큰 용량의 망을 구성할 수 있는 파장분할 다중방식이 주목받고 있다<sup>[4]</sup>.

WDM 방식을 이용한 네트워크는 싱글홉 네트워크(singlehop network)와 멀티홉 네트워크(multihop network)으로 나뉜다. 싱글홉 네트워크는 가변파장 송수신기(tunable transceiver)를 이용하여 중계 노드를 거치지 않고 한 번에 착신 노드(destination node)로 전송하는 네트워크이다. 데이터 패킷을 전송하려는 노드의 송신기를 하나의 파장으로 튜닝하고, 그것을 받는 노드의 수신기도 같은 파장으로 튜닝하여 전송하는 방식이다. 반면에 멀티홉 네트워크는 파장이 고정된 송수신기를 이용하여 다른 중계 노드를 거쳐서 착신 노드에 데이터 패킷을 전송하는 네트워크이다. 한번의 전송을 위해서 여러번 파장을 바꾸면서 중계 노드들을 거쳐야 하는 단점이 있지만, 파장이 고정된 송수신기를 쓰므로 가격이 싸고 현재의 기술로도 광 통신망을 구현할 수 있는 장점이 있다. 멀티홉 네트워크를 구현하기 위해서

여러 가지 망 토폴로지(network topology)가 제안되어 있다. 그 중에서 셔플넷 토폴로지는 시간 지연(delay)이 적고, 효율이 높은 장점이 있어 많은 연구가 진행되고 있다. 그리고 셔플넷을 변형하여 통신망의 성능을 더욱 더 높이려는 시도가 계속됨에 따라 몇 가지 변형된 셔플넷 토폴로지도 제안되었다. 본 논문에서는 효과적인 멀티홉 네트워크 구현을 위해 셔플넷 토폴로지를 위주로 분석하여 (de Brujin, Kautz, MSN 방식등을 고려하지 않음)성능이 개선된 새로운 토폴로지를 소개하고, 성능을 분석해서 기존의 다른 셔플넷 토폴로지들에 비해 시간 지연(delay)과 수율(throughput)의 측면에서 성능이 개선됨을 보인다. 본 논문의 구성은 제 II장에서 여러 종류의 셔플넷 네트워크를 소개하고 제 III장에서는 비대칭 이중층 셔플넷 네트워크를 일반적인 네트워크의 관점에서 다른 셔플넷 구조와 비교·분석하고, 제 IV장에서는 비대칭 이중층 셔플넷에서의 채널공유 방법들을 제시한 후에 제 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 셔플넷(ShuffleNet) 네트워크

셔플넷은 프로세서(processor)간의 병렬 데이터 전송을 위해 1970년대에 처음 제안되었다<sup>[9]</sup>.

A.S.Acampora가 1987년에 셔플넷을 광 통신망에 응용할 것을 처음 제안한 이후, WDM 멀티홉 네트워크를 구현하기 위한 토폴로지로서 가장 많이 연구되고 있다<sup>[5][8]</sup>. 이 장에서는 일반적인 셔플넷, 양방향 셔플넷, 이중층 셔플넷, 제안된 비대칭 이중층 셔플넷의 구조와 특징들을 비교 설명한다.

### 1. 셔플넷(ShuffleNet)

셔플넷 토폴로지는 이름이 의미하는 것처럼 카드를 섞는 것과 유사한 방식으로 노드들을 연결한다.

그림 1과 같이 임의의 노드에서 다음 열(column)의 노드로 연결할 때, 위쪽의 노드들과 아래쪽의 노드들을 엇갈리게 연결을 한다. (p, k) 셔플넷에서, p는 다음 열에서 연결되는 노드의 개수를 나타내고, k는 열의 수를 나타낸다. 마지막 열은 k개의 열 다음에 첫 번째 열이 다시 연결되는 순환적 구조를 이루고 있는 것을 보이기 위한 것이다. 셔플넷 토폴로지서 하나의 열은  $p^k$ 개의 노드로 되어있고, 전체 노드의 개수는  $N = kp^k$ 이다. 그리고 N개의 각 노드마다 p개의 채널을 가지므로 필요한 전체 채널 수  $W = pN = kp^{k+1}$ 이다.

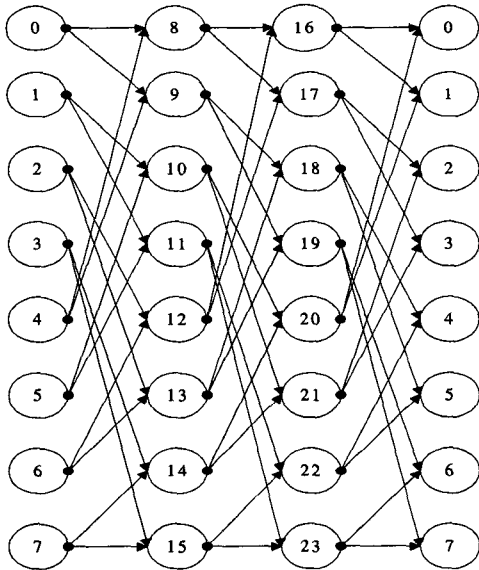


그림 1. (2, 3) 셔플넷

그림 1은 (2, 3) 셔플넷으로, 다음 열에서 2개의 노드들과 연결되며(p=2), 열의 개수는 3개이다(k=3). 하나의 열에 있는 노드 개수는 2<sup>3</sup>=8개이고, 전체 노드의 개수 N은 3 · 2<sup>3</sup>=24개이다. 그리고 24개의 각 노드마다 2개의 채널을 가지므로 필요한 전체 채널 수 W는 48개이다. 그림 1에서 각 노드는 LAN 또는 WAN 구조를 형성할 수 있도록 NIU(Network Interface Unit)를 갖고 사용자 혹은 노드들과 연결된다. 편의상 NIU의 입출력 장치는 생략하고 송신기와 수신기만을 나타내었다. 파장을 바꿔가며 전송할 때, 홉수(hops)는 몇번이나 노드를 옮겨가는가를 나타내는 변수로 멀티홉 네트워크에서 몇 번째 파장인가를 나타내는 수치가 되며 h로 표기하기로 한다. 홉수가 1인 노드라는 것은 첫 번째 파장만을 써서 도달하는 노드를 의미하고, 홉수 h=2 라는 것은 파장을 한번 바꿔서 두 번째 파장까지 써야 도달할 수 있는 노드를 뜻한다. 홉수 h만에 도달 가능한 노드 수를 도달 노드수 n(h)로 정의한다. 최대 홉수(diameter)는 가장 먼 노드(가장 여러번 파장을 바꿔야 도달할 수 있는 노드)에 이르기까지의 홉수를 나타내는 것으로 셔플넷의 최대 홉수는 아래 식(1)로 결정된다<sup>[6]</sup>.

$$D = 2k - 1 \tag{1}$$

(2, 3)구조의 셔플넷에서 최대 홉수는 2k-1 = 2 × 3-1 = 5가 되며, 홉수가 1일 때 도달하는 노드

수 n(1)은 p개이고, 홉수가 2 일 때 도달하는 노드 수 n(2)는 p<sup>2</sup>개임을 알 수 있다. n(h)는 식(2)와 같다<sup>[6]</sup>.

$$n(h) = \begin{cases} p^k & : h = 1, 2, \dots, k-1 \\ p^k - p^{h-k} & : h = k, \dots, 2k-1 \end{cases} \tag{2}$$

평균 홉수는 식(3)과 같다.

$$E[\text{hops}] = \frac{\sum_{i=1}^{D=2k-1} i \cdot n(i)}{N - 1} \tag{3}$$

$$= \frac{kp^k(p-1)(3k-1) - 2k(p^k-1)}{2(N-1)(p-1)}$$

최대 홉수와 평균 홉수가 적을 수록 중계 노드가 줄어들므로 시간 지연을 줄일 수 있고 효율을 높일 수 있다. 셔플넷 토폴로지는 평균 홉수가 다른 멀티홉 네트워크 토폴로지에 비해 작기 때문에 주목을 받고 있으며 셔플넷을 개선하여 더욱 높은 효율을 가지는 토폴로지를 만들려는 시도가 계속되고 있다.

### 2. 양방향 셔플넷(Bidirectional ShuffleNet)

양방향 셔플넷은 기존의 셔플넷에서 한쪽으로부터 진행하던 것을 양쪽 방향으로 모두 진행하게 한 토폴로지이다. 노드의 배열은 기존의 셔플넷과 같게 하고 연결만을 바꾼 것으로 전체 노드수 N은 그대로이고, 왼쪽 방향으로의 경로가 새로이 생겼으므로 전체 채널수 W는 셔플넷의 2배인 2pN = 2kp<sup>k+1</sup>이다. 최대 홉수 D는 식(4)와 같다<sup>[9]</sup>.

$$D = \begin{cases} \frac{3k-1}{2}, & k \text{ odd} \\ \frac{3k-2}{2}, & k \text{ even} \end{cases} \tag{4}$$

k ≫ 1인 경우, 기존의 (p, k) 셔플넷의 최대 홉수가 개략적으로 2k에 비례하는데 비해, 양방향 셔플넷의 최대 홉수는 3k/2에 비례하므로 평균 홉수가 줄어드는 것을 알 수 있다. 양방향 셔플넷의 평균 홉수는 식(5)와 같다<sup>[9]</sup>.

k가 홀수(odd)일 때 (5)

$$E[\text{hops}] = \frac{p^2(4k + p^k(5k^2 - 1)) + 2(k^2 - 1) - k^2(2p - 1)(5p^k + 2)}{4(p-1)^2(kp^k - 1)} + \frac{8p^{k/2}(p^{3/2} + p^{1/2}) - p^k(14p + 1) - 4(k-p) - 2}{4(p-1)^2(kp^k - 1)}$$

k가 짝수(even)일 때

E[hops] =

$$\frac{-2+2p^{\frac{k}{2}}+N(k+\frac{3}{2}-2kp-2p+kp^2+\frac{p^2}{2})}{(N-1)(1-p^2)}$$

### 3. 이중층 셔플넷(Bilayered ShuffleNet)

양방향 셔플넷의 경우 왼쪽 진행과 오른쪽 진행이 오른쪽으로만 진행되는 기존의 셔플넷 경로로 양방향성을 갖는 것에 반해 이중층 셔플넷은 그림 1에서처럼 오른쪽 진행시 기존의 셔플넷 경로와 같고, 왼쪽 진행시 기존의 셔플넷 경로를 왼쪽에서 오른쪽으로 진행하는 것을 추가하여 양방향 셔플넷보다 성능을 개선한 토폴로지이다. 노드의 배열은 기존의 셔플넷과 동일하게 하고 연결만을 바꾼 것으로, 전체 노드수 N은 그대로이고, 왼쪽 방향으로의 경로가 생겼으므로 전체 채널수 W는 기존의 셔플넷의 2배인  $2pN = 2kp^{k+1}$  이다. 최대홉수는 식(6)과 같다<sup>[10]</sup>.

$$D = \begin{cases} k, & k \text{ odd} \\ k+1, & k \text{ even} \end{cases} \quad (6)$$

$k \gg 1$ 인 경우, 기존의 (p, k) 셔플넷의 최대 홉수가 개략적으로 2k에 비례하고 양방향 셔플넷의 최대 홉수는 3k/2에 비례하는데 비해 이중층 셔플넷은 k에 비례하므로 평균 홉수가 줄어드는 것을 알 수 있다. 이중층 셔플넷의 평균 홉수는 식(7)과 같다<sup>[10]</sup>.

k가 홀수(odd)일 때 (7)

E[hops] =

$$\frac{kN(1-p)^2+N(1-p)+(p^k-p^{k-1})-2(1-p^{\frac{k-1}{2}})}{(N-1)(1-p)^2}$$

k가 짝수(even)일 때

E[hops] =

$$\frac{-2+2p^{\frac{k}{2}}+N(k+\frac{3}{2}-2kp-2p+kp^2+\frac{p^2}{2})}{(N-1)(1-p^2)}$$

### 4. 비대칭 이중층 셔플넷

(Asymmetric Bilayered ShuffleNet : ABS)

본 논문에서 새롭게 제안하는 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지는 그림 2와 같이 오른쪽 방향으로의 연결은 셔플넷과 같게 하고 왼쪽 방향의 경로는 새

로운 알고리즘을 이용하여 새롭게 만들었다. 각 노드에는 이차원 주소를 할당하였다. (a,b)의 형태로 된 주소에서 a는 몇 번째 열인가를 나타내고, b는 열에서 위에서부터 시작하여 몇 번째 노드인가를 나타낸다( $0 \leq a \leq k, 0 \leq b \leq p^k - 1$ ).

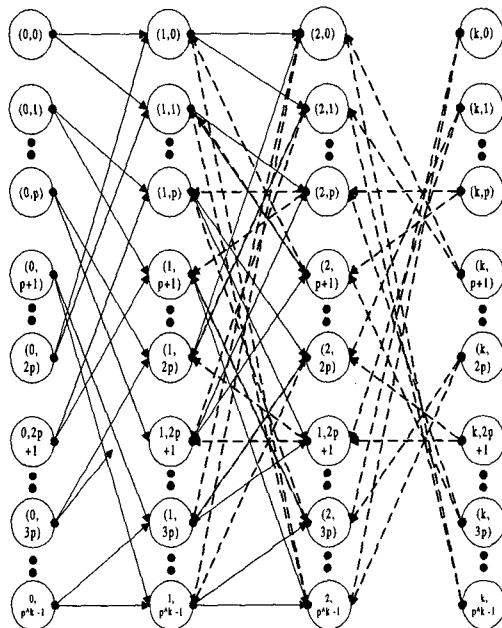


그림 2. (p, k) 비대칭 이중층 토폴로지

그림 2는 열에서 몇 번째 노드인지를 나타내는 b를 p진수로 나타내어 그린 것이다. 각 노드의 주소는  $(a, b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0)$ 의 형태로 되어있고  $b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0$ 는 열에서 위에서부터 시작하여 몇 번째 노드인가를 나타내고, k bit이며 각 bit는 p진수이다. 오른쪽 방향으로 진행할 때에는  $b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0$  중에서  $b_{k-2}\dots b_2b_1b_0$  부분을 주소의 앞 부분으로 갖는 노드들로 연결되고 왼쪽으로 진행할 때에는  $b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0$  중에서  $b_{k-2}\dots b_2b_1b_0$  부분의 각 비트들에 대한 p-1 보수를 취한 것을 주소의 앞 부분으로 갖는 노드로 연결된다. 즉 경로 선택의 규칙은 다음과 같다.

- $(a, b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0) \rightarrow$
- $(a+1, b_{k-2}\dots b_2b_1b_0b_x) : \text{오른쪽}$
- $(a, b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0) \rightarrow$
- $(a+1, \overline{b_{k-2}\dots b_2b_1b_0}b_x) : \text{왼쪽}$

단,  $b_x$ 는  $b$ 의  $p-1$ 에 대한 보수를 나타내고,  $b_x$ 는 새로 추가되는 bit를 나타낸다.

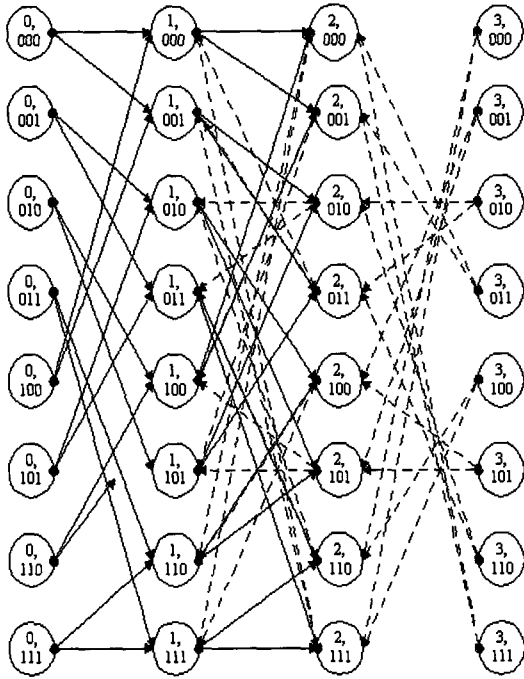


그림 3. (2, 3) 토폴로지의 경로 설정

그림 3은 (2, 3) 토폴로지의 경우를 예로 든 것으로,  $p$ 가 2이므로 주소가 이진수로 되어 있다. 노드 (0,100)에서 오른쪽으로 진행 시에는 뒤쪽의 00을 주소의 앞쪽으로 가지는 노드 (1,000)과 노드 (1,001)로 연결된다. (0,100)과 같은 노드인 (3,100)에서 왼쪽으로 진행 시에는 00의 1에 대한 보수인 11을 주소의 앞쪽으로 가지는 노드 (2,110)과 노드 (2,111)로 연결된다. 비대칭 이중층 토폴로지의 노드 배열은 기존의 셔플넷과 동일하게 하고 연결만을 바꾼 것으로, 전체 노드수  $N=kp^k$  로 셔플넷과 같고, 왼쪽 방향으로의 경로가 생겼으므로 전체 채널 수  $W$ 는 기존의 셔플넷의 2배인  $2pN=2kp^{k+1}$  개이다. 비대칭 이중층 셔플넷에서의 최대홉수, 평균홉수 등에 대한 분석 및 기존 셔플넷 토폴로지들과의 비교분석은 다음 장(III)에서 다룬다.

### III. 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지의 성능분석

이 장에서는 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지의 최대 홉수와 평균 홉수를 구하고, 이를 이용해서 수율(throughput)과 시간 지연(delay) 등을 계산하여

기존의 토폴로지와 성능을 비교, 평가한다.

#### 1. 최대 홉수

최대 홉수  $D$ 는 식(8)과 같다. ( $k \bmod 4 = 0$  은  $k$ 를 4로 나눈 나머지가 0임을 뜻한다.)

$$p \text{가 } 2 \text{ 일 때,} \tag{8}$$

$$D = \begin{cases} k+1, & k \bmod 4 = 0 \\ k, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p \text{가 } 3 \text{ 이상일 때,}$$

$$D = \begin{cases} k, & k \text{ odd} \\ k+1, & k \text{ even} \end{cases}$$

표 1. 각 셔플넷 토폴로지들의 최대 홉수 비교

토폴로지	노드수(N)	채널수(W)	최대 홉수(D)
셔플넷	$kp^k$	$kp^k$	$2k-1$
양방향 셔플넷	$kp^k$	$2kp^{k+1}$	$\begin{cases} (3k-1)/2, & k \text{ odd} \\ (3k-2)/2, & k \text{ even} \end{cases}$
이중층 셔플넷	$kp^k$	$2kp^{k+1}$	$\begin{cases} k, & k \text{ odd} \\ k+1, & k \text{ even} \end{cases}$
비대칭 이중층 셔플넷	$kp^k$	$2kp^{k+1}$	$p=2$ $\begin{cases} k+1, & k \bmod 4 = 0 \\ k, & \text{otherwise} \end{cases}$
			other wise $\begin{cases} k, & k \text{ odd} \\ k+1, & k \text{ even} \end{cases}$

표 1은 각 토폴로지의 전체 노드수, 전체 채널수와 최대 홉수를 보여준다.  $k \gg 1$ 인 경우, 비대칭 이중층 토폴로지의 최대 홉수는  $k$ 에 비례하고 이중층 셔플넷의 최대 홉수도  $k$ 에 비례하므로 최대 홉수는 거의 같다고 볼 수 있다. 그러나 최대 홉수가 같고 해서 성능이 같은 것은 아니며 평균 홉수에 의해 그 성능이 달라지게 된다.

#### 2. 평균 홉수

비대칭 이중층 셔플넷의 평균 홉수는 식 (9)와 같다.

$$k \text{가 홀수(odd)일 때} \tag{9}$$

$$E[\text{hops}] = \frac{-4 + kN(1-p)^2 + \frac{k}{2} p^{k-2}(-2p^2 + p^2 + 1) + \frac{3}{2} p^{k-2}(p^2 - 1) + p^{\frac{k-3}{2}}(3p+1)}{(N-1)(1-p)^2}$$

$$k \text{가 짝수(even)일 때}$$

$$k \bmod 4 = 2 \text{ 이고 } p = 2 \text{ 일 때,}$$

$$E[\text{hops}] = \frac{-4 + kN(1-p)^2 + (1-p)^{2(kp-2)}p^{k-2} + 4p^{\frac{k-2}{2}}}{(N-1)(1-p)^2}$$

$k \bmod 4 = 2$  이고  $p \neq 2$  일 때,

$$E[\text{hops}] =$$

$$\frac{-4 + kN(1-p)^2 + (1-p)^{2k} + 4p^{\frac{k-2}{2}} + \frac{k}{2} p^{k-1} (p-2)(1-p)^2}{(N-1)(1-p)^2}$$

$k \bmod 4 = 0$  일 때

$$E[\text{hops}] =$$

$$\frac{-4 + N(k + \frac{1}{2})(1-p)^2 + k(1-p)(p^k + p^{k-2}) + 4p^{\frac{k}{2}}}{(N-1)(1-p)^2}$$

비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지와 기존의 다른 셔플넷 토폴로지와 비교를 위해 각각의 평균 홉수 계산식 식(3), (5), (7), (9)를 이용하여,  $p$ 와  $k$ 의 값을 변화시켜 보면서 네트워크 노드수가 증가함에 따른 평균 홉수의 변화를 관찰해 보고, 네트워크 효율성을 평가해 보았다. 그림 4에서 보듯이 노드수가 증가함에 따라 평균 홉수는 증가하나 같은 노드수에 대해서는 셔플넷 보다는 양방향 셔플넷의 평균 홉수가 적고 이것보다 이중층 셔플넷은 더 적은 것을 확인할 수 있다. 이중층 셔플넷 보다 새로 제안한 비대칭 이중층 셔플넷의 평균홉수가 더 적은 것을 알 수 있고 그 결과 수율이 증가하게 되어 네트워크의 성능이 좋아지게 된다.

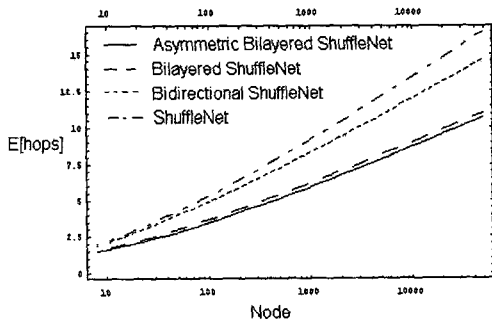


그림 4. 노드수 증가에 따른 평균홉수 비교

### 3. 수율(Throughput)

토폴로지의 성능을 비교하기 위한 중요한 기준의 하나는 얼마나 많은 데이터를 전송할 수 있는가를 나타내는 수율이다. 멀티홉 네트워크에서 수율을 구하기 위해 몇가지 변수를 다음과 같이 정의한다.

$\Gamma$  : 신호 발생율

$E$  : 평균 홉수

$\lambda$  : 유효 신호 발생율 =  $\Gamma \cdot E$

$n$  : 가상 링크의 개수

$C$  : 한 파장의 채널 용량

$C_{vi}$  : 가상 링크의 용량

$C_{tot}$  : 전체 네트워크의 용량 =  $n \cdot C_{vi}$

$\sigma$  : 노드당 수율

네트워크에서의 신호 발생율(arrival rate)을  $\Gamma$ 라고 정의할 때, 발생한 신호가 전송이 완료되기까지 평균 홉수만큼 파장을 바꾸어 재전송을 해야하므로 유효 신호 발생율은  $\Gamma \cdot E$ 가 된다. 채널을 공유하지 않을 경우, 가상 링크 하나에 파장을 하나씩 할당하므로 가상 링크의 채널 용량과 한 파장의 채널 용량은 같다( $C_{vi}=C$ ). 전체 네트워크에  $n$ 개의 가상 링크가 있으므로, 전체 네트워크 용량은  $C_{tot}$ 은  $n \cdot C_{vi}$ 이 된다. 전체 네트워크 용량을 초과하는 신호 발생에 대해서는 전송이 불가능하므로, 전체 네트워크 용량이 유효 신호 발생율  $\lambda$ 의 상한선이 된다.

$$\lambda \leq C_{tot} = n \cdot C_{vi} \quad (10)$$

여기에  $\lambda = \Gamma \cdot E$ 를 대입하여 정리하면, 식(11)을 얻을 수 있다.

$$\Gamma \leq \frac{n \cdot C_{vi}}{E} \quad (11)$$

전체 수율(total throughput)의 최대값은 최대 신호 발생율과 같고, 노드당 수율은 전체 수율을 노드수로 나눈 것이다. 식(12)는 전체 수율과 노드당 수율의 최대값에 대한 식이다.

$$\Gamma_{max} = \frac{n \cdot C_{vi}}{E} \quad (12)$$

$$\sigma_{max} = \frac{n \cdot C_{vi}}{EN}$$

식(12)를 써서 각 토폴로지의 수율을 구한 결과가 식(13)부터 (16)에 나타나 있다. 여기서  $E_{sh}$ ,  $E_{di}$ ,  $E_{bi}$ ,  $E_{asym}$ 은 각각 셔플넷, 이중층 셔플넷, 비대칭 이중층 셔플넷의 평균 홉수를 의미한다.

1) 기존의 셔플넷 구조

$$n = pN \quad (13)$$

$$E = E_{sh}$$

$$\sigma_{max} = \frac{n \cdot C_{vi}}{E \cdot N} = \frac{p \cdot C}{E_{sh}}$$

2) 양방향 셔플넷 구조

$$n = 2pN \quad (14)$$

$$E = E_{di}$$

$$\sigma_{max} = \frac{n \cdot C_{vl}}{E \cdot N} = \frac{2 \cdot p \cdot C}{E_{di}}$$

3) 이중층 셔플넷 구조

$$n = 2pN \tag{15}$$

$$E = E_{bi}$$

$$\sigma_{max} = \frac{n \cdot C_{vl}}{E \cdot N} = \frac{2 \cdot p \cdot C}{E_{bi}}$$

4) 비대칭 이중층 셔플넷 구조

$$n = 2pN \tag{16}$$

$$E = E_{asym}$$

$$\sigma_{max} = \frac{n \cdot C_{vl}}{E \cdot N} = \frac{2 \cdot p \cdot C}{E_{asym}}$$

식(13), 식(14), 식(15)와 식(16)을 사용하여 (2, 3) 토폴로지들의 최대 수율을 비교한 것을 표 2에 나타내었다. 여기서, 채널 용량 C는 모두 1[Gb/s]로 같다고 가정했다. 양방향 셔플넷, 이중층 셔플넷과 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지는 기존의 셔플넷보다 2배의 채널을 사용하므로, 최대 수율이 기존의 2 배 이상이 되어야 성능이 향상되었다고 할 수 있는데, 표 2에서 볼 수 있듯이 특히 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지의 최대 수율은 거의 3배 정도로 향상됨을 알 수 있다.

표 2. (2, 3) 토폴로지 성능 비교 (N=24, C=1[Gb/s])

토폴로지	전체 최대 수율(Gb/s)	노드당 수율 (Mb/s)	시간 지연 E[hops]
셔플넷	14.71	613	3.261
양방향 셔플넷	40.15	1673	2.391
이중층 셔플넷	40.90	1704	2.348
비대칭 이중층	44.47	1853	2.217

그림 5는 사용자당 수율을 나타내고 있는데 비대칭 이중층 셔플넷이 다른 셔플넷 구조보다 노드당 수율이 높은 것을 확인 할 수 있다.

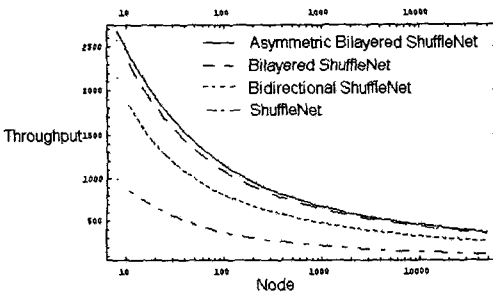


그림 5. 노드수 증가에 따른 수율변화

4. 시간 지연

멀티홉 네트워크에서의 시간 지연은 평균 홉수 E에 비례한다. 멀티홉 네트워크 시스템에서 시간 지연은 다음의 세가지 요인에 의하여 발생한다. 첫째, 전송을 시작하기 전에 채널을 할당받기 위해 기다리는 대기시간과 둘째로 전송을 할 때 신호가 광섬유를 진행해 나가는 데 소요되는 진행 시간(propagation time)과 셋째로 프로세싱 지연(processing delay)이 있다. (시간 지연) ≈ (평균홉수)와 같이 표현할 수 있는데, 이는 멀티홉 네트워크 상의 노드는 고정 파장 송수신기를 사용하기 때문에 파장을 튜닝하는 작업이 필요치 않으므로 채널 할당 대기 시간은 무시할 수 있으며 진행 시간과 프로세싱 지연이 모두 평균 홉수에 비례하기 때문이다<sup>[4]</sup>. 비대칭 이중층 셔플넷 구조는 논리적으로 제한한 구조이기 때문에 시간 지연의 크고 적음을 평균 홉수를 가지고 상대적으로 평가하게 되는 것이다.

IV. 채널공유

기존의 발표된 WDM 네트워크용 여러 가지 셔플넷 토폴로지 및 본 논문에서 새롭게 제안한 비대칭 이중층 셔플넷을 실제로 하드웨어를 이용하여 구현하고자 할 때, 가장 먼저 직면하는 문제는 가입자수의 증가에 따라 서로 다른 파장을 모두 할당할 수 있는가 하는 것이다. 기술적으로는 어느 정도 가능하겠지만 시스템의 크기가 방대해지고 가격이 매우 높아질 것이며 유지보수 또한 심각한 문제로 떠오를 것이다. 이러한 문제를 해결하는 방법이 채널공유이다. 채널공유는 사용 가능한 파장의 수가 제한될 경우를 대비해서, 하나의 파장을 여러 개의 링크에 할당하는 방식이다. 채널 공유 방식으로는 단순한 TDMA(Time Division Multiplexing Access)방식과 WDM cross-connect방식이 있다. TDMA방식은 기존의 발표된 셔플넷 구조들에 적용되어 필요한 채널 수를 상당히 줄이는 효과가 있음이 알려져 있다<sup>[8]</sup>. 비대칭 이중층 토폴로지의 경우 각 노드들을 독립적인 그룹으로 나누는 것이 가능하여 TDMA방식과 더불어 WDM cross-connect방식을 적용함으로써 필요 채널수를 더욱 크게 줄일 수 있다.

1. TDMA를 이용한 채널 공유

WDM 기술로 최근에 128개의 파장 채널을 다중화하여 전송한 것이 보고되어 있다<sup>[11]</sup>. 128개의 채

널이 있고 하나의 링크에 하나의 파장을 할당한다면, 서플넷 토폴로지로는 64개의 노드까지, 비대칭 이중층 토폴로지로는 32개 노드까지 수용할 수 있다. 여러개의 링크에 하나의 파장을 할당하면, 파장을 공유하는 비율만큼 수용 가능한 노드 수도 늘릴 수 있다. 또한 망에 접속하기 위한 장치인 NIU를 하나의 송신기와 하나의 수신기만으로도 만들 수 있어 송수신기(tranceiver)의 수도 줄일 수 있다. 예를 들어 4개의 링크가 하나의 파장을 공유한다면, 수용 가능한 노드 수가 4배로 늘어난다. 이때 파장을 공유한 링크들이 충돌을 일으키지 않게 하기 위해 TDMA를 사용한다. 채널을 공유하기 위한 2가지 예를 생각해 보자. 먼저 첫 번째 예는 그림 6(채널 공유 방식 A)과 같이 오른쪽으로 진행하는 링크와 왼쪽으로 진행하는 링크를 다른 파장을 사용하고, 하나의 열에서 p개의 노드에 같은 파장을 사용하는 것이다. 하나의 열에서 p개의 노드를 같은 파장으로 할당하는 'p 노드 채널 공유' 방식은 서플넷 TDMA 채널 공유 방식 중에서 가장 효율이 높은 방식이다<sup>[8]</sup>.

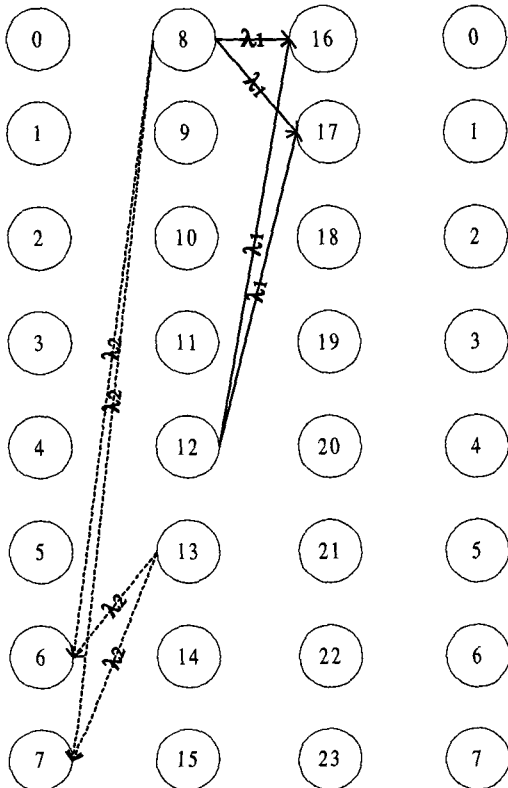


그림 6. 공유방식 A (Forward/Backword 전송시 각기 다른 파장 사용)

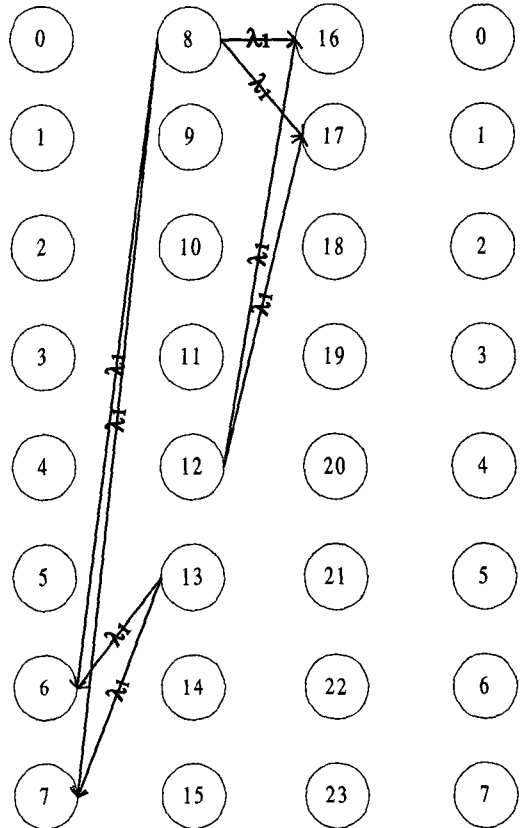


그림 7. 공유방식 B (Forward/Backword 전송시 각기 다른 파장 사용)

두 번째 예는 그림 7(채널 공유 방식 B)과 같이 양쪽으로 진행하는 링크 모두 같은 파장을 할당하는 것이다. 채널을 공유하지 않는 경우에 비해, 그림 6과 같은 방식은  $p^2$ 배 만큼 많은 노드를 수용할 수 있고, 필요한 채널 수  $W$ 도 공유를 하지 않은 경우의  $2pN$ 개에 비해  $2N/p$ 개로 줄어들게 된다. 또한 NIU를 구성하기 위해 필요하던 송수신기의 수도 4개씩에서 2개씩으로 줄어든다. 대신 가상 링크의 용량  $C_{vi}$  이 채널용량  $C$ 와 달라지게 된다.  $p^2$ 개의 링크를 하나의 파장으로 공유하므로  $C_{vi}$  은  $C/p^2$ 로 줄어들게 된다. 그림 7과 같은 방식은 채널을 공유하지 않는 경우에 비해  $2p^2$  배만큼 많은 노드를 수용할 수 있다. 필요한 채널 수  $W$ 도 공유를 하지 않은 경우의  $2pN$ 개의 비해  $N/p$ 개로 줄어들고, 송수신기의 수도 4개씩에서 하나씩으로 줄어든다. 그림 6의 방식에 비해 2배의 노드를 수용할 수 있으나, 많은 링크들이 하나의 채널을 공유하므로 시간 지연이 커지는 단점이 있다.  $2p^2$ 개의 링크를 하나의 파장으로 공유하므로,  $C_{vi}$ 은  $C/2p^2$ 가 된다. TDMA



를 이용한 채널 공유의 단점은 시간 지연이 커지는 것과 채널을 공유하는데 한계가 있는 것이다. 이런 문제점을 극복하기 위해 제안된 WDM cross-connect를 다음절에 기술한다.

2. WDM Cross Connect를 이용한 채널 공유

주어진 서플넷의 논리적 토폴로지가 규칙적이고 독립적인 그룹들로 나누어질 때에 한해서, 물리적 토폴로지로서 WDM cross-connect 스위치를 사용할 수 있다. WDM cross-connect 스위치를 사용할 경우 필요한 채널 수  $W$ 가 크게 줄어든다. 예를 들면, 비대칭 이중층 토폴로지의 경우에는  $2pN$ 개에서  $2p$ 개로 줄어든다. WDM cross-connect 스위치를 구현하기 위해서는 파장 다중기(wavelength multiplexer)와 역다중기(wavelength de-multiplexer)를 사용하는 방법과 브래그 회절 격자(bragg diffraction grating)를 이용하는 방법이 있다. 브래그 회절 격자를 사용하는 것이 삽입 손실(insertion loss)이 작고, 부피도 작은 장점이 있다. 비대칭 이중층 서플넷 토폴로지를 관찰하면, 독립적이고 같은 연결 형태를 가지는 그룹들로 나눌 수 있음을 알 수 있다.

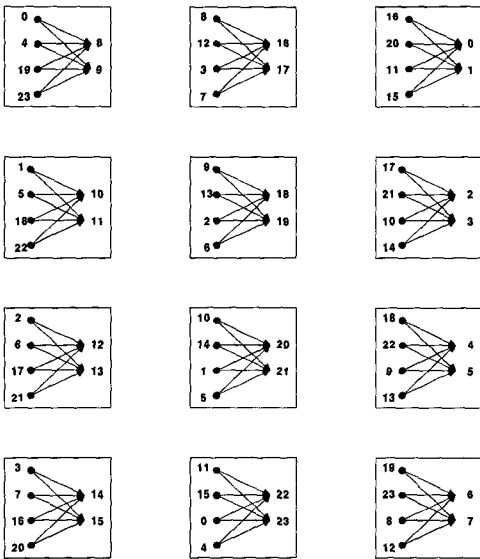


그림 8. (2, 3) 토폴로지의 노드를 12개의 그룹으로 나누는 예

( $p, k$ )토폴로지의 경우, 그림 8과 같이  $kp^{k-1}$ 개의 그룹으로 나눌 수 있다. 각 그룹은  $2p$ 개의 송신기와  $p$ 개의 수신기로 이루어져 있고, 이들의 연결을 위해  $2p \times p$  cross-connect 스위치  $kp^{k-1}$ 개가 필요하다. 각각의 스위치들은 서로 완벽히 독립적이기 때문에

그림 8에서보면 4개의 행으로 다시 그룹을 만들 수 있다. 편의상 1행을 스위치1 이라고 하고 2행을 스위치2 라고 하며 3행을 스위치3, 4행을 스위치4 라고 하고 예를 들어 설명하면, 노드0에서 출발하여 노드23으로 도착하고자 할 때는 1행 1열의 스위치1이 동작하여 노드9로 연결된다. 다음에 2행 2열의 스위치2가 동작하여 노드9와 노드18이 연결된다. 그리고 3행 3열의 스위치3이 동작하여 노드18과 노드4가 연결된다. 결국, 4행 2열의 스위치4가 동작하여 노드4와 노드23이 연결됨으로써 전체 사용채널은 4개의 채널을 사용하게 된다. 여기서, 독립적인 스위치들이 3개의 열로 다시 그룹화 하는 것을 고려하면 3개의 열을 공유함으로써 3개의 채널만 사용하기 때문에 위에서 예로 들었던 노드0에서 출발하여 노드23으로 도착하는 것은 연결가능하지만, 전체 사용채널은 4개의 채널을 사용하기 때문에 3개의 열로 그룹화하는 것은 불가능하게 된다. (2, 3)토폴로지의 예에서, 채널을 공유하지 않을 경우  $2pN=96$ 개의 채널이 필요한 반면에, WDM cross-connect를 쓸 경우에 4개의 채널만이 필요하므로 필요 채널 수를 크게 줄일 수 있다. 표 3에 채널을 공유하지 않을 경우, TDMA를 이용할 경우와 WDM cross-connect를 이용한 경우에 대해 필요 채널 수  $W$ 를 비교하였다. 결론적으로, 비대칭 이중층 서플넷 토폴로지의 경우, 독립된 그룹으로 묶는 것이 가능하므로 WDM cross-connect 스위치의 이용이 가능하고, 이 경우 ( $p, k$ )토폴로지를 구현하기 위해서는  $2p$ 개의 채널만 있으면 된다.

표 3. 채널 공유방식에 따른 필요 채널 수

	노드 수 (N)	링크 수 (m)	한 파장으로 공유하는 링크 수	필요채널 (W)	
공유를 않을 때	$kp^k$	$2pN$	1	$2pN$	
TDM 방식을 사용한 경우	공유 방식 A	$kp^k$	$2pN$	$p^k$	$2pN/p^k$
	공유 방식 B	$kp^k$	$2pN$	$2p^k$	$2pN/2p^k$
WDM cross-connect 사용	$kp^k$	$2pN$	-	$2p$	

V. 결론

본 논문에서는 WDM 멀티홉 네트워크에 대해 알아보고, 이중층 서플넷 구조를 변형한 새로운 토폴로지를 소개하였다. 새로 제안한 토폴로지의 최대

흡수와 평균 흡수를 구하고, 수율, 시간 지연을 계산하여 기존의 토폴로지와 성능을 비교하였다. 또한, 비대칭 이중층 셔플넷 구조에서의 채널 공유 방안을 제시하였다. 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지가 기존의 토폴로지에 비해 수율과 시간 지연에 있어서 성능이 개선되었음을 확인하였다. 또한, 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지에서는 송신기  $2p$ 개와 수신기  $p$ 개를 하나의 그룹으로 하여 대칭적인 몇 개의 그룹으로 나눌 수 있어, WDM cross-connect 스위치를 사용할 경우  $N$ 개의 노드를 연결하기 위해 필요한 채널 수를  $2pn$ 개에서  $2p$ 개로 줄일 수 있음을 보였다. 이것은 채널을 의미하는 사용파장수를 줄임으로써 노드비용절감을 의미한다. 이와 같이 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지는 성능 및 구현 측면에서 네트워크 노드의 추가, 삭제를 위한 알고리즘을 추가적으로 적용 보완한다면 가까운 장래에 도래할 WDM 광네트워크에 매우 적합한 토폴로지로서 사용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

[1] Max Ming-Kang Liu, "Principles and Applications of Optical Communication", IRWIN, pp. 4 15-487, 1996.  
 [2] B.Mukherjee, "WDM-Based Local Lightwave Networks Part I : Single -Hop Systems," *IEEE Network Mag.*, vol. 6, pp. 12-26, May. 1992.  
 [3] B.Mukherjee, "WDM-Based Local Lightwave Networks Part II : Multi -Hop Systems," *IEEE Network Mag.*, vol. 8, pp. 20-32, Jul. 1992.  
 [4] B.Mukherjee, "Optical Communication Networks", McGrawHill, pp. 171-197, 1997.  
 [5] C.A.Brackett, "Dense Wavelength Division Multiplexing Networks : Principles and Applications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 948-964, Aug. 1990.  
 [6] M.G.Hluchyj and M.J.Karol, "ShuffleNet : An Application of Generalized Perfect Shuffles to Multihop Lightwave Networks," *INFOCOM'88 Conf. Proc.*, pp. 379-390, Mar. 1988.  
 [7] A.S.Acampora and M.J.Karol, "An Overview of Lightwave Packet Networks," *IEEE Network Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 29-41, Jan. 1989.  
 [8] M.Koga and K.Sato, "Optical Cross Connect

System", *OECC'97 Conf. Proc.*, pp. 80-81, July. 1997.

[9] H.K.Han and Y.K.Jhee, "A WDM Channel Sharing Scheme Multihop Lightwave Networks Using Logically Bidirectional Perfect Shuffle Inter-connection Pattern," *IEICE Trans. Comm.*, vol. E77-B, no. 9, pp. 1152-1161, September 1994.  
 [10] F.Ayadi J.F.Hayes and M.Kavehrad, "Bilayered ShuffleNet : A New Logical Configuration for Multihop Lightwave Networks," *GLOBECOM '93 Conf. Proc.*, pp. 1159-1163, 1993.  
 [11] M.Ogawara, A.Hiramatsu, "Feasibility Demonstrations of Hyper-Media Photonic Information Networks Using Prototype WDM Broadcast-and-Select Local Network Systems," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E82-C, no. 2, pp. 265-273, Feb.1999.

여 인 영(Inyoung Yeo)

준희원



1998년 2월 : 경원대학교  
공과대학 전자공학과 졸업  
(공학사)  
1999년 3월~현재 : 명지대학교  
공과대학 전자정보통신  
공학부 석사과정

<주관심 분야> 편광제어, 광네트 워크, IP over DWDM

이 승 원(Seungwon Lee)

정희원



1998년 9월 : 경원대학교  
전자공학과 (공학석사)  
1998년 10월~1999년 2월 :  
명지대학교 정보통신  
공학과 인턴연구원  
1999. 3~현재 : 동남보건대학  
안경광학과 전임 강사

<주관심 분야> 광신호처리, 광가입자망, 광교환기

신 서 응(Seoyong Shin) 정회원



1987년 2월 : 서울대학교 공과  
대학 제어계측공학과  
졸업(공학사)

1989년 8월 : Florida Tech.  
Electrical Eng.  
(공학석사)

1992년 12월 : Texas A&M Univ. Electrical Eng.  
(공학박사)

1993년 2월~1994년 8월 : 한국전자통신연구원 선임  
연구원

1994년 9월~현재 : 명지대학교 전자정보통신공학부  
부교수

<주관심 분야> 광스위칭 시스템 구조, 광 버퍼, 자동  
편광제어 시스템, 편광모드분산 보상, 초고  
속 OTDM신호 발생