

# WDM 멀티홉 광 통신망을 위한 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지

正會員 池尹圭\*, 許廷源\*\*

## Asymmetric Bilayered ShuffleNet for WDM Multihop Lightwave Networks

Yoon Kyoo Jhee\*, Jeong Won Heo\*\* Regular Members

### 要 約

본 논문에서는 WDM 멀티홉 통신망을 효과적으로 구현하기 위한 새로운 논리적 토폴로지인 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지를 제안한다. 제안한 토폴로지의 최대 홉수와 평균 홉수를 이용하여 수율과 시간 지연을 계산하고, 제안한 토폴로지가 수율과 시간 지연의 측면에 있어서 이전에 발표된 셔플넷 토폴로지와 이중층 셔플넷 토폴로지에 비해 성능이 개선됨을 보인다.

### ABSTRACT

In this paper we propose an asymmetric bilayered ShuffleNet for optical WDM(wavelength division multiplexing) multihop networks. We calculate the diameter and the average number of hops of the proposed asymmetric bilayered ShuffleNet. Using the result, we also calculate throughputs and delays of the proposed topology, which show higher efficiencies compared to the conventional ShuffleNet and the bilayered ShuffleNet.

---

\*이화여자대학교 전자공학과  
Dept. of Electronics Engineering, Ewha  
Womans University

\*\*한국과학기술원 전기 및 전자공학과  
Dept. of Electrical Engineering, KAIST  
論文番號 : 94360-1210  
接受日字 : 1994年 12月 10日

## I. 서 론

전화가 발명된 이후로 시작된 통신 서비스는 전자장비의 빠른 개발로 인해 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 이러한 통신 서비스 분야의 계속적인 발전은 음성 정보 외에 영상 정보와 데이터 정보 등을 전송할 수 있는 광대역 서비스에 대한 요구를 발생시켰다. 광대역 서비스의 예로는 주문형 비디오(VOD : video on demand), 화상 회의, CATV 등의 영상 서비스와 고속 데이터통신 등이 있다. 기존의 동축 케이블로는 방대한 양의 정보를 처리하기 어려우므로, 20THz~30THz의 넓은 대역폭과 0.2dB/km의 저손실 특성을 갖는 광섬유를 이용한 광(光) 통신망이 광대역(廣帶域) 서비스를 위해서 필수적이다.

광 통신망을 구성하는데 있어서 한 가지 문제점은 전자소자의 신호처리 속도가 10GHz정도로 제한되기 때문에 수십 THz에 이르는 광섬유 대역폭의 0.1% 정도 밖에 사용할 수 없다는 것이다<sup>1)</sup>. 이런 전자소자에 의한 신호처리의 병목현상을 줄이고 대역폭을 효율적으로 활용하기 위한 광다중화기술이 연구되고 있다. 광다중화기술에는 광시분할 다중방식(OTDM : optical time division multiplexing), 파장분할 다중방식(WDM : wavelength division multiplexing)과 광부호분할 다중방식(OCDM : optical code division multiplexing)이 있다. 이 중에서 가장 큰 용량의 통신망을 구성할 수 있는 파장분할 다중방식이 주목받고 있다.

파장분할 다중방식은 광섬유의 저손실 대역을 파장영역에서 여러 개의 채널로 분할하여 사용하는 방식으로 광섬유의 넓은 대역을 활용하기 위해서 몇 개의 파장에 각기 다른 신호를 실어서 여러 신호를 하나의 광섬유로 전송한다. 다른 파장을 사용하여 전송하므로 각 채널은 서로 독립적이고 하나의 광섬유로 양방향 통신이 가능하며, 데이터 형태에 있어 투과성(transparency)이 있어 서로 다른 전송율(data rate)을 갖는 신호들도 함께 전송할 수 있다. 파장분할 다중방식은 싱글홉(singlehop) 네트워크 방식과 멀티홉(multihop) 네트워크 방식이 있고, 각각의 방식에 대한 여러 가지 망 구성방식(network topology)에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>2)</sup>.

<sup>3)</sup>

본 논문에서는 멀티홉 네트워크 방식의 대표적인 망 구성방법인 셔플넷 토폴로지(ShuffleNet topology)를

변형한 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지를 제안하고, 수율(throughput)과 시간 지연(delay)의 측면에서 성능이 향상됨을 보인다. 본 논문의 2장에서는 멀티홉 네트워크의 하나인 셔플넷 네트워크와 이를 변형한 기존의 토폴로지에 대해 정리하고, 3장에서 새로운 토폴로지를 제안한다. 4장에서는 다른 토폴로지와 제안한 토폴로지의 성능을 비교, 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 셔플넷 네트워크(ShuffleNet)

### 2.1 멀티홉 네트워크(Multihop network)

멀티홉 네트워크는 여러 개의 송수신기를 써서 파장을 바꾸면서 다른 중계 노드를 거쳐서 착신 노드에 데이터를 전송하는 네트워크이다. 그림 1과 같은 멀티홉 네트워크에서, A노드에서 B노드( $\lambda_1$  사용)나 E노드( $\lambda_3$  사용)로는 파장을 바꾸지 않고 한 번에 데이터를 전송할 수 있지만, C노드로 전송하기 위해서는 먼저 파장 1을 사용하여 B노드로 전송한 후에 파장을 2로 바꿔서 다시 C노드로 전송해야 한다. 데이터를 A노드에서 D노드로 전송하려면, B노드와 C노드를 중계 노드로 사용하여 파장을 두 번 바꾸면서 전송할 수 있다. 여기서 파장을 2로 바꾼다는 것은 여러개의 송신기 중에서 2의 파장을 갖는 송신기를 사용한다는 뜻이다.

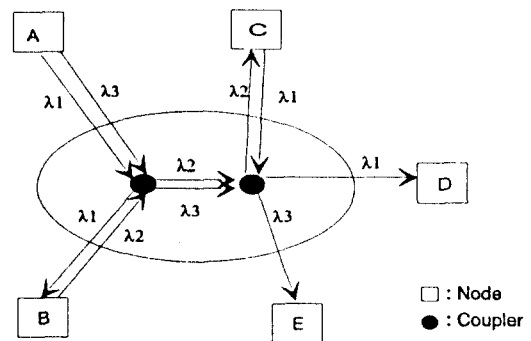


그림 1. 멀티홉 네트워크  
Figure 1. Multihop network

각 노드의 망 접속 장치(NIU : Network interface Unit)의 구조를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 NIU는 2개의 송신기와 하나의 출력장치로 구성된 송신부와 2개의 수신기와 입력장치로 이루어진 수신부를 가진다. 송신기로는 전기신호를 광신호로 변환하는 레이저 다이오드를 사용하고 수신기는 광신호를 전기신호로 변환하는 광다이오드(photodiode)를 사용한다.

멀티홉 네트워크는 데이터를 전송하기 위해 여러 번 파장을 바꿔가면서 중계 노드를 거쳐야 하는 단점이 있지만, 파장이 고정된 송수신기를 쓰므로 소자의 가격이 싸고 현재의 기술로도 광 통신망을 구현할 수 있는 장점이 있다. 멀티홉 네트워크 구현시에 가장 중요한 것은 중계 횟수를 줄여서 효율을 높이는 것이다. 멀티홉 네트워크의 효율적인 망 구성을 위해 셔플넷(ShuffleNet), MSN(Manhattan Street Network), 하이퍼큐브(Hypercube) 등의 여러 가지 논리적 토폴로지(logical topology)가 제안되어 있다. 그 중에서 셔플넷 토폴로지는 평균 홉수(파장 변환 횟수)가 적어서 시간 지연이 작고, 효율이 높은 장점이 있어 많은 연구가 진행되고 있다.

2.2 셔플넷(ShuffleNet)

H.S.Stone이 프로세서(processor)간의 데이터 전송을 위해 1971년에 처음 셔플넷을 제안했다. A.S.Acampora가 1987년에 셔플넷을 광 통신망에 용

용할 것을 처음 제안한 이후, WDM 네트워크를 구현하기 위한 토폴로지로서 가장 많이 연구되고 있다<sup>4,5)</sup>.

셔플넷 토폴로지는 이름이 의미하는 것처럼 카드를 섞는 것과 유사한 방식으로 노드들을 연결한다. 그림 3과 같이 하나의 노드에서 다음 열(column)의 노드로 연결할 때 윗 쪽의 노드들과 아랫쪽의 노드들을 엇갈리게 연결을 한다. (p, k) 셔플넷에서, p는 다음 열에 연결되는 노드의 갯수를 나타내고, k는 열의 수를 나타낸다. 그림 3에서 마지막 열은 세개의 열다음에 첫번째 열이 다시 연결되는 순환적 구조를 이루고 있는 것을 보이기 위한 것이다. 셔플넷 토폴로지에서 하나의 열은 p<sup>k</sup>개의 노드로 되어있고, 전체 노드의 갯수 N = kp<sup>k</sup>이다. 그리고 N개의 각 노드마다 p개의 채널을 가지므로 필요한 전체 채널수 W = pN = kp<sup>k+1</sup>이다. 그림 3은 (2, 3) 셔플넷의 예로 임의의 노드에서 다음 열에 있는 2개의 노드들과 연결되고, 열의 갯수는 3개이다. 하나의 열에 노드 갯수는 2<sup>3</sup> = 8 개이고, 전체 노드의 갯수는 N = 24 이다.

홉수(hops)는 몇 번 파장을 사용하여 목적 노드에 도달하는가를 나타내는 변수를 의미하고 h로 표기하기로 한다. 홉수가 1인 노드라는 것은 첫번째 파장만을 써서 도달하는 노드를 의미하고, 홉수 h=2 라는 것은 파장을 한번 바꿔서 두번째 파장까지 써야 도달할 수 있는 노드를 뜻한다. 홉수 h만에 도달 가능한 노드를 n(h)로 표기하기로 한다. 최대 홉수(diameter)는 가장 먼 노드

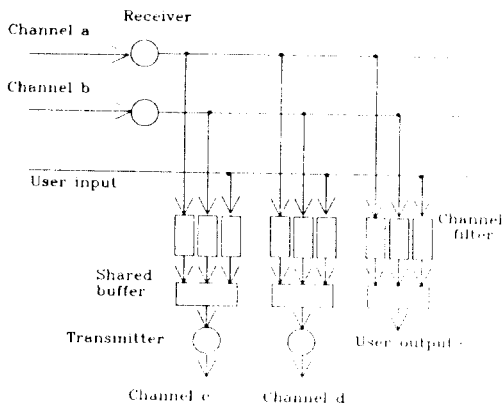


그림 2. 망 접속 장치  
Figure 2. NIU(Network Interface Unit)

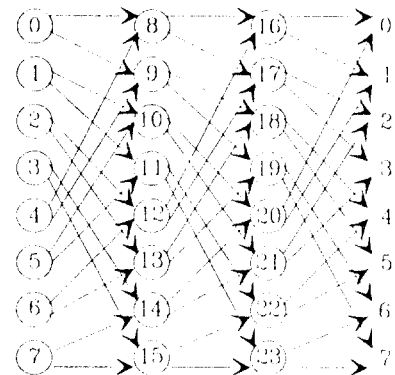


그림 3. (p, k) 셔플넷 토폴로지 : p=2, k=3 일 때의 예  
Figure 3. (p, k) ShuffleNet topology : p=2, k=3

(가장 여러번 파장을 바꿔야 도달하는 노드)에 이르기까지의 홉수를 나타내는 것으로 셔플넷의 최대 홉수는 식(1)과 같다<sup>[6]</sup>.

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

그림 3에서 보는 것처럼 홉수가 1일때 도달하는 노드 수  $n(1)$ 은  $p$ 개이고, 홉수가 2일때 도달하는 노드 수  $n(2)$ 는  $p^2$ 개임을 알 수 있다.  $n(h)$ 는 식(2)와 같다.

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

평균 홉수는 식(2)를 이용해서 식(3)과 같이 구한다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{aligned} E[\text{hops}] &= \frac{\sum_{i=1}^{D=2k-1} i \cdot n(i)}{N-1} \\ &= \frac{1 \cdot n(1) + 2 \cdot n(2) + \dots + (2k-1) \cdot n(2k-1)}{N-1} \\ &= \frac{kp^k(p-1)(3k-1) - 2k(p^k-1)}{2(N-1)(p-1)} \end{aligned} \tag{3}$$

최대 홉수와 평균 홉수가 작을수록 전송에 필요한 시간이 줄어들므로 시간 지연을 줄일수 있고 효율을 높일 수 있다. 셔플넷 토폴로지는 평균 홉수가 다른 멀티홉

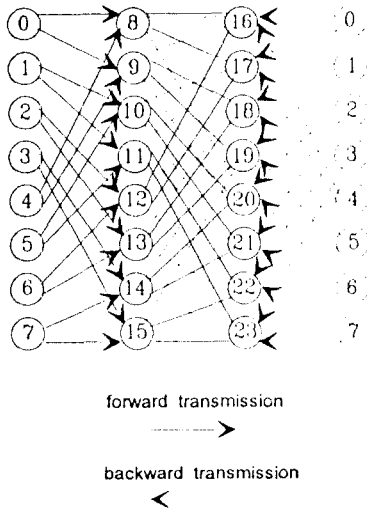


그림 4. (p, k) 이중층 셔플넷 : p=2, k=3 일 때의 예  
Figure 4. (p, k) Bilayered ShuffleNet : p=2, k=3

토폴로지에 비해 작기때문에, 많은 연구가 진행되어 왔다. 또한 셔플넷을 변형하여 더욱 높은 효율을 가지는 토폴로지를 만들려는 시도가 계속 되고 있다. 다음 절에서는 변형된 셔플넷에 대해 알아본다.

### 2.3 이중층 셔플넷(Bilayered shuffleNet)

이중층 셔플넷은 기존의 셔플넷에서 한쪽에서만 진행하던 것을 그림 4에서처럼 왼쪽 방향의 경로를 새로이 만든 토폴로지이다<sup>[7]</sup>. 왼쪽 방향의 경로도 셔플넷으로 하여 양쪽 방향으로 모두 진행하게 하여 성능을 개선하는 구조이다. 노드의 배열은 기존의 셔플넷과 동일하게 하고 연결만을 바꾼 것으로 전체 노드수  $N$ 은 셔플넷과 같고, 왼쪽 방향으로의 경로가 생겼으므로 전체 채널수  $W$ 는 기존의 셔플넷의 2배인  $2pN = 2kp^{k+1}$  이다. 최대 홉수  $D$ 는 식(4)와 같다<sup>[7]</sup>.

$$D = \begin{cases} k, & k \text{ odd} \\ k+1, & k \text{ even} \end{cases} \tag{4}$$

$K \gg 1$ 인 경우, 셔플넷의 최대 홉수가  $2k$ 에 비례하는데 비해 이중층 셔플넷은  $k$ 에 비례한다. 이중층 셔플넷의 평균 홉수는 식(5)와 같다<sup>[7]</sup>.  $K$ 가 홀수(odd)일때,

$$E[\text{hops}] = \frac{kN(1-p^2) + N(1-p) + (p^k - p^{k-1}) - 2(1-p)^{\frac{k-1}{2}}}{(N-1)(1-p)^2} \tag{5.a}$$

이고,  $k$ 가 짝수(even)일때

$$E[\text{hops}] = \frac{-2 + 2p^{\frac{k}{2}} + N(k + \frac{3}{2}) - 2kp - 2p + kp^2 + \frac{p^2}{2}}{(N-1)(1-p)^2} \tag{5.b}$$

이다.

### III. 제안하는 비대칭 이중층 셔플넷

본 논문에서 제안하는 토폴로지는 기존의 셔플넷을 개선한 것이다. 그림 5와 같이 오른쪽 방향으로의 연결은 셔플넷과 같게 하고, 왼쪽 방향의 경로를 새로이 만들었다. 각 노드에는 이차원 주소(address)를 할당하였다. (a, b)의 형태로 된 주소에서 a는 몇 번째 열인가를 나타내고, b는 열에서 위에서부터 시작하여 몇 번째 노드인가를 나타낸다. ( $0 \leq a \leq k, 0 \leq b \leq p^k-1$ )

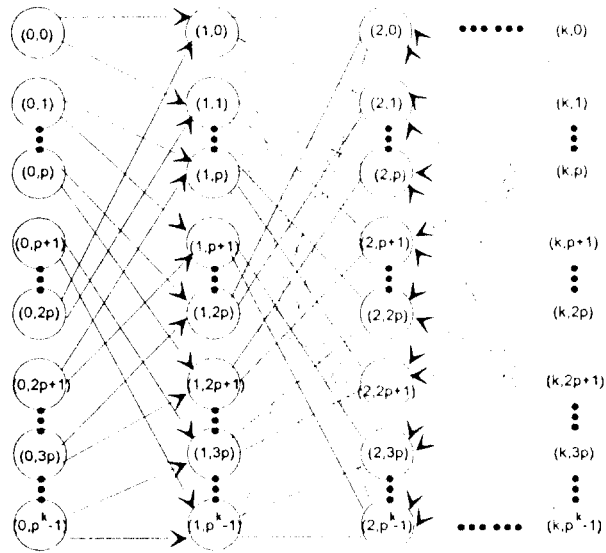


그림 5. 제안하는  $(p, k)$  비대칭 이중층 셔플넷 :  $p=2, k=3$  일 때의 예  
 Figure 5.  $(p, k)$  Proposed asymmetric bilayered ShuffleNet :  $p=2, k=3$

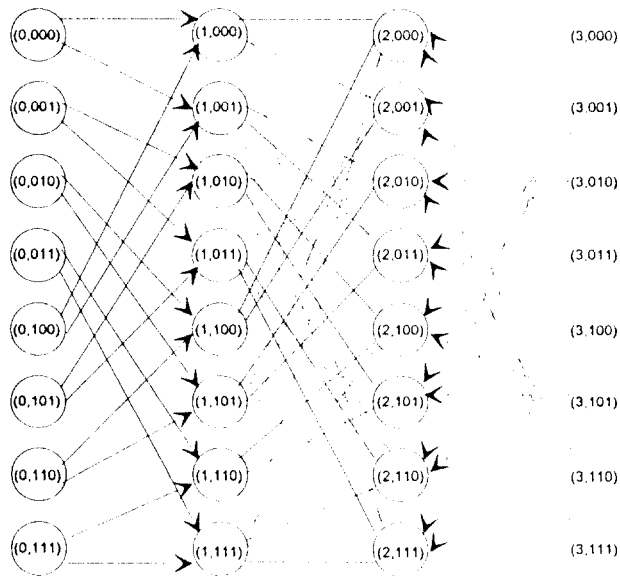


그림 6. 제안한  $(p, k)$  비대칭 이중층 셔플넷의 라우팅 설명 :  $p=2, k=3$  일 때의 예  
 Figure 6. The routing of  $(p, k)$  proposed asymmetric bilayered ShuffleNet

그림 6은 경로 선택(routing) 방법을 설명하기 위하여, 열에서 몇번째 노드인지를 나타내는  $b$ 를  $p$ 진수로 나타내어 다시 그린 것이다. 그림 6에서 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 몇번째 노드인가를 나타내고,  $k$  bit이며 각 bit는  $p$ 진수이다.

오른쪽 방향으로 진행시에는  $b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0$ 중에서  $b_{k-2}\dots b_2b_1b_0$ 부분을 주소의 앞쪽으로 가지는 노드들로 연결되고 왼쪽으로 진행시에는  $b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0$ 중에서  $b_{k-2}\dots b_2b_1b_0$ 부분의 각 비트들을 'p-1'에 대한 보수를 취한 것을 주소의 앞쪽으로 가지는 노드들로 연결된다. 즉, 경로 선택(routing)의 규칙은 다음과 같다.

$(a, b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0) \rightarrow (a+1, \overline{b_{k-2}}\dots \overline{b_2} \overline{b_1} \overline{b_0} b_k)$  : 오른쪽  
 $(a, b_{k-1}b_{k-2}\dots b_2b_1b_0) \rightarrow (a-1, \overline{b_{k-2}}\dots \overline{b_2} \overline{b_1} \overline{b_0} b_k)$  : 왼쪽  
 단,  $\overline{b}$ 는  $b$ 의 'p-1'에 대한 보수를 나타내고,  
 $b_k$ 는 새로 추가되는 bit를 나타낸다.

그림 6은 (2, 3) 토폴로지의 경우를 예로 든 것으로,  $p$ 가 2이므로 주소가 이진수로 되어 있다. 그림 6에서 노드 (0, 100)에서 오른쪽으로 진행시에는 뒤쪽의 00을 주소의 앞쪽으로 가지는 노드 (1, 000)과 노드 (1, 001)로 연결된다. (0, 100)과 같은 노드인 (3, 100)에서 왼쪽으로 진행시에는 00의 1에 대한 보수인 11을 주소의 앞쪽으로 가지는 노드 (2, 110)과 노드 (2, 111)로 연결된다.

제안한 토폴로지는 노드 배열을 기존의 서플넷과 동일하게 하고 연결만을 바꾼 것으로, 전체 노드수  $N = kp^k$ 로 서플넷과 같고, 왼쪽 방향으로의 경로가 생겼으므로 전체 채널수  $W$ 는 기존의 서플넷의 2배인  $2pN = 2kp^{k+1}$  개이다. 제안한 토폴로지에서는 경로 선택시에 하나의 노드에서 선택할 수 있는 경로의 수는  $2p$ 개로, 경로의 수가 서플넷의  $p$ 개에 비해서 2배로 많고 이중층 서플넷의  $2p$ 개와는 같다. 그러므로 제안한 비대칭 이중층 서플넷 토폴로지에서는 경로 선택(routing)의 복잡도(complexity)는 서플넷 토폴로지보다 2배 복잡하고, 이중층 서플넷과 비교해서는 같은 복잡도를 가진다.

#### IV. 성능 분석

2장에서 기존의 토폴로지들에 대해 정리하고, 3장에

서 제안하는 토폴로지를 설명하였다. 이 장에서는 제안한 서플넷의 최대 홉수와 평균 홉수를 구하고, 이를 이용해서 수율(throughput)과 시간지연(delay)등을 계산하여 기존의 토폴로지와 성능을 비교, 평가한다.

#### 4.1 최대 홉수

최대 홉수  $D$ 는 식(6)과 같다. ( $k \bmod 4 = 0$  은  $k$ 를 4로 나눈 나머지가 0임을 뜻한다.) $p$ 가 2일 때,

$$D = \begin{cases} k+1, & k \bmod 4 = 0 \\ k, & otherwise \end{cases} \quad (6.a)$$

$p$ 가 3 이상일 때,

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

표 1에서 각 토폴로지의 전체 노드수, 전체 채널수와 최대 홉수를 보여준다.  $K \gg 1$ 인 경우, 제안한 토폴로지의 최대 홉수는  $k$ 에 비례하고 이중층 서플넷의 최대 홉수도  $k$ 에 비례하므로 최대 홉수는 거의 같다고 볼 수 있다. 그러나 최대 홉수가 같다고 해서 성능이 같은 것은 아니다. 최대 홉수가 같아도 평균 홉수는 틀리기 때문이다.

표 1. 토폴로지들의 최대 홉수 비교  
 Table 1. The comparison of diameters for topologies

토폴로지	노드 수(N)	채널 수(W)	최대 홉수(D)	
서플넷	$kp^k$	$kp^{k+1}$	$2k-1$	
이중층 서플넷	$kpk$	$2kpk+1$	$k$	$k \text{ odd}$
			$k+1$	$k \text{ even}$
제안한 토폴로지	$kp^k$	$2kp^{k+1}$	$p=2$	$k+1 \text{ } k \bmod 4=0$
				$k \text{ otherwise}$
			otherwise	$k, \text{ } k \text{ odd}$
				$k+1, \text{ } k \text{ even}$

그림 7은  $p$ 가 2이고  $k$ 가 3일 때 제안한 토폴로지의 최대 홉수가  $k=3$ 임을 보여주는 예이다.<sup>(2, 3)</sup> 이중층 서플넷의 최대 홉수도 역시 3이지만 도달 노드 수는 틀린 것을 알 수 있다. 제안하는 토폴로지의 경우  $n(1)=4, n(2)=10, n(3)=9$ 이고, 이중층 서플넷의 경우  $n(1)=4, n(2)=7, n(3)=12$ 로 도달 노드 수가 틀리므로, 평균 홉수도 틀려지게 된다. (2, 3) 토폴로지의 경우, 제안한

토폴로지의 평균 흡수는 2.217이고 이중층 서플넷의 평균 흡수는 2.348이다.

4.2 평균 흡수

제안한 토폴로지의 평균 흡수를 계산하기 위해서는 우선 도달 가능한 노드수  $n(h)$ 를 구해야 한다.  $n(h)$ 는 식(7)과 같다.

평균 흡수는  $n(h)$ 와 최대 흡수  $D$ 를 이용하여 계산할 수 있다.

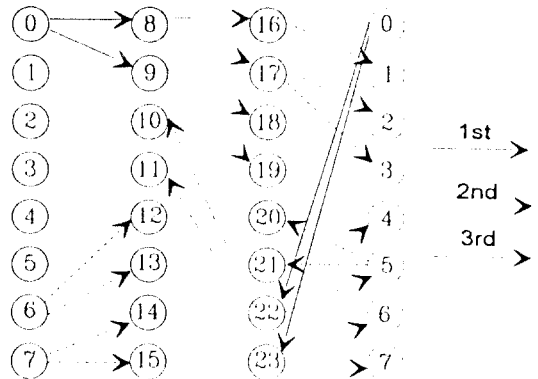


그림 7. (p, k) 제안한 토폴로지의 최대 흡수 설명 : p=2, k=3  
Figure 7. The diameter of the (p, k) proposed topology : p=2, k=3

1) k가 홀수(odd)일 때,

$$n(h) = \begin{cases} (h+1)p^k - (h-3)p^{k-4} & ; h = 1, 2, \dots, \frac{k-1}{2} \\ (h+1)p^k - (h-3)p^{k-4} - (h - \frac{k-1}{2})p^{h-1} & ; h = \frac{k+1}{2} \\ (h+1)p^k - (h-3)p^{k-4} - (h - \frac{k-1}{2})p^{h-1} - (h - \frac{k+1}{2})p^{h-3} & ; h = \frac{k+3}{2} \\ (h+1)p^k - (k+1-h)p^{k-4} - (h - \frac{k-1}{2})p^{h-1} - (h - \frac{k+1}{2})p^{h-3} & ; h = \frac{k+5}{2}, \dots, k-1 \\ k(p^k - p^{k-1}) - (k+1-h)p^{k-4} - \frac{k-1}{2}p^{k-2} - (h - \frac{k+1}{2})p^{h-3} & ; h = k \end{cases} \quad (7.a)$$

2) k가 짝수(even)일 때,

i-1)  $k \bmod 4 = 2$ 이고  $p=2$ 일 때,

$$n(h) = \begin{cases} (h+1)p^k - (h-3)p^{k-4} & ; h = 1, 2, \dots, \frac{k}{2} \\ (h+1)p^k - (h-3)p^{k-4} - (2h-k)p^{h-2} & ; h = \frac{k}{2} + 1, \frac{k}{2} + 2 \\ (h+1)p^k - (k+1-h)p^{k-4} - (2h-k)p^{h-2} & ; h = \frac{k}{2} + 3, \dots, k-1 \\ k(p^k - p^{k-1}) - p^{k-4} - (k-1)p^{k-2} & ; h = k \end{cases} \quad (7.b)$$

i-2)  $k \bmod 4 = 2$ 이고  $p \neq 2$ 일 때,

$$n(h) = \begin{cases} (h+1)p^k - (h-3)p^{k-4} & ; h = 1, 2, \dots, \frac{k}{2} \\ (h+1)p^k - (h-3)p^{k-4} - (2h-k)p^{h-2} & ; h = \frac{k}{2} + 1, \frac{k}{2} + 2 \\ (h+1)p^k - (k+1-h)p^{k-4} - (2h-k)p^{h-2} & ; h = \frac{k}{2} + 3, \dots, k-1 \\ \frac{k}{2}p^k - p^{k-4} - (k-1)p^{k-2} & ; h = k \\ \frac{k}{2}p^k - kp^{k-1} & ; h = k+1 \end{cases} \quad (7.c)$$

ii)  $k \bmod 4 = 0$  일 때,

$$n(h) = \begin{cases} (h+1)p^h - (h-3)p^{h-4} ; h=1,2, \dots, \frac{k}{2}-1 \\ \frac{k}{2}p^h - (h-3)p^{h-4} ; h=\frac{k}{2}+1, \frac{k}{2}+2 \\ \frac{k}{2}(p^h - p^{h-4}) ; h=\frac{k}{2}+3, \dots, k-1 \\ \frac{k}{2}(p^h - p^{h-4} - p^{h-2}) ; h=k \\ \frac{k}{2}(p^h - p^{h-3} - p^{h-1}) ; h=k+1 \end{cases} \quad (7d)$$

평균 홉수는  $n(h)$ 와 최대 홉수  $D$ 를 이용하여 계산할 수 있다.

$$E[\text{hops}] = \sum_{i=1}^D \frac{i \cdot n(i)}{N-1} \quad (8)$$

평균 홉수의 계산 결과는 식(9)와 같다.

$k$ 가 홀수(odd)일때 평균 홉수는 식(9.a)와 같다.

$$E[\text{hops}] = \frac{-4 + kN(1-p)^2 + \frac{k}{2}p^{k-2}(-2p^3 + p^2 + 1) + \frac{3}{2}p^{k-2}(p^2 - 1) + p^{\frac{k-3}{2}}(3p+1)}{(N-1)(1-p)^2} \quad (9.a)$$

$K \bmod 4 = 2$ 이고  $p=2$ 일때, 평균 홉수는 식(9.b)와 같다.

$$E[\text{hops}] = \frac{-4 + kN(1-p)^2 + (1-p^2)(kp - 2)p^{k-2} + 4p^{\frac{k-2}{2}}}{(N-1)(1-p)^2} \quad (9.b)$$

$K \bmod 4 = 2$ 이고  $p \neq 2$ 일때, 평균 홉수는 식(9.c)와 같다.

$$E[\text{hops}] = \frac{-4 + kN(1-p)^2 + (1-p^2)(kp - 2)p^{k-2} + 4p^{\frac{k-2}{2}} + \frac{k}{2}p^{k-1}(p - 2)(1-p)^2}{(N-1)(1-p)^2} \quad (9.c)$$

$K \bmod 4 = 0$ 일때, 평균 홉수는 식(9.d)와 같다.

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

$$\frac{-4 + N(k + \frac{1}{2})(1-p)^2 + k(1-p)(p^k + p^{k-2}) + 4p^{\frac{k}{2}}}{(N-1)(1-p)^2} \quad (9.d)$$

### 4.3 효율

평균 홉수가 클수록 효율이 낮아지고 평균 홉수가 작을수록 효율이 높아지므로, 멀티홉 네트워크에서는 효율(efficiency)을 식(10)과 같이 평균 홉수의 역수로 정의하여 사용하고 있다.

$$\eta = \frac{1}{E[\text{hops}]} \quad (10)$$

그림 8에서는 각 토폴로지의 효율 비교를 보여준다. 그림 8.a는  $p$ 를 2로 고정하고  $k$ 값을 변화시킬 때의 그림이고, 그림 8.b는  $p$ 를 3으로 고정하고  $k$ 값을 변화시켰을 때의 그림이다.  $p$ 가 짝수(even)일때는 그림 8.a에서 보는 것처럼 제안한 토폴로지의 성능이 이중층 서플넷보다 항상 좋다는 것을 알 수 있다.  $p$ 가 홀수(odd)일때는  $k$ 가 4의 배수일때마다 이중층 서플넷보다 아주 근소한 차이로 성능이 떨어짐을 볼 수 있다. 그러나 4의 배수가 되는 곳을 제외하고는 여전히 제안한 토폴로지의 성능이 이중층 서플넷보다 효율이 높은 것을 알 수 있다.

그림 9는  $k$ 를 고정하고  $p$ 를 변화시켰을 때의 그림이다. 그림 9.a는  $k$ 를 2로 고정하고  $p$ 를 변화시켜가면서 그린 것이고, 그림 9.b는  $k$ 를 4로 고정하고  $p$ 를 변화시켜가면서 그린 것이다.  $k$ 가 4의 배수가 아닐 때에는, 그림 9.a에서 보는 것처럼 제안한 토폴로지의 성능이 가장 좋다는 것을 알 수 있다.  $k$ 가 4의 배수일 때에는, 그림 9.b에서 보는 것처럼  $p$ 가 홀수일 때에는 이중층 서플넷의 효율이 높고,  $p$ 가 짝수일 때에는 제안한 토폴로지의 성능이 좋다는 것을 알 수 있다. 또한,  $k$ 가 4의 배수일 때에는 그 차이가 미소하여 그림에서 두 곡선이



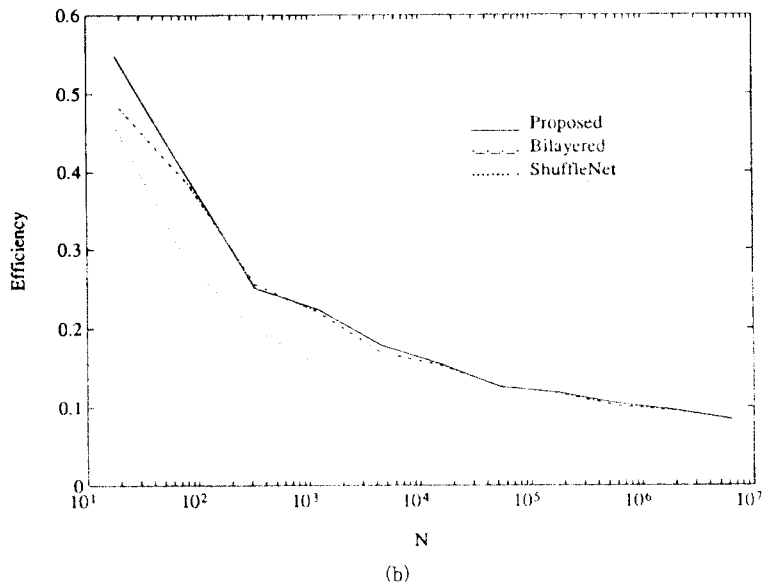
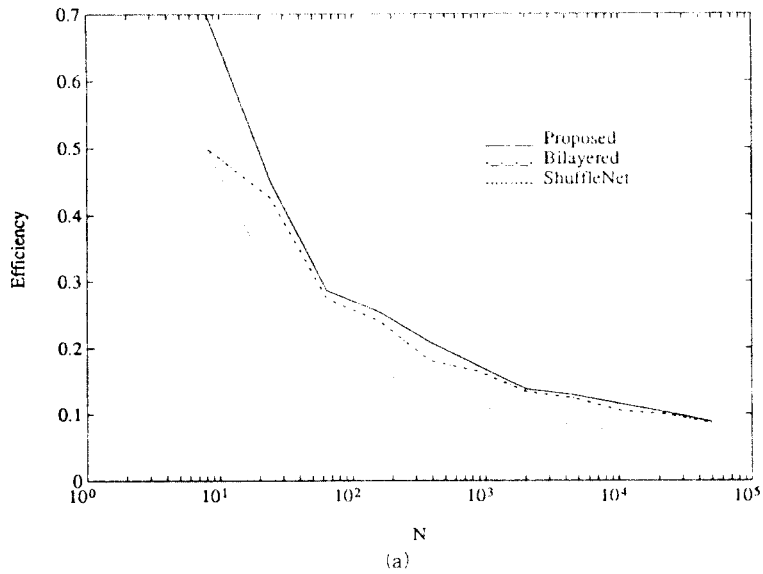


그림 8. 효율 그래프 : (a)  $p$ 가 짝수 일때( $p=2$ ), (b)  $p$ 가 홀수 일때( $p=3$ )  
 Figure 8 The graph of the efficiency : (a)  $p$  is even( $p=2$ ), (b)  $p$  is odd( $p=3$ )

거의 붙어 있다.

결론적으로, 제안한 토폴로지가 이중층 셔플넷보다  $p$ 가 홀수이고,  $k$ 가 4의 배수일 때를 제외하고는 다른 토폴로지보다 효율이 높음을 알 수 있다.  $p$ 가 홀수이고,

$k$ 가 4의 배수일 때(전체의 1/8에 해당됨)에도 제안한 토폴로지와 이중층 셔플넷의 효율은 아주 근소한 차이만 날 뿐이므로 전체적으로 보아 성능이 개선되었다.

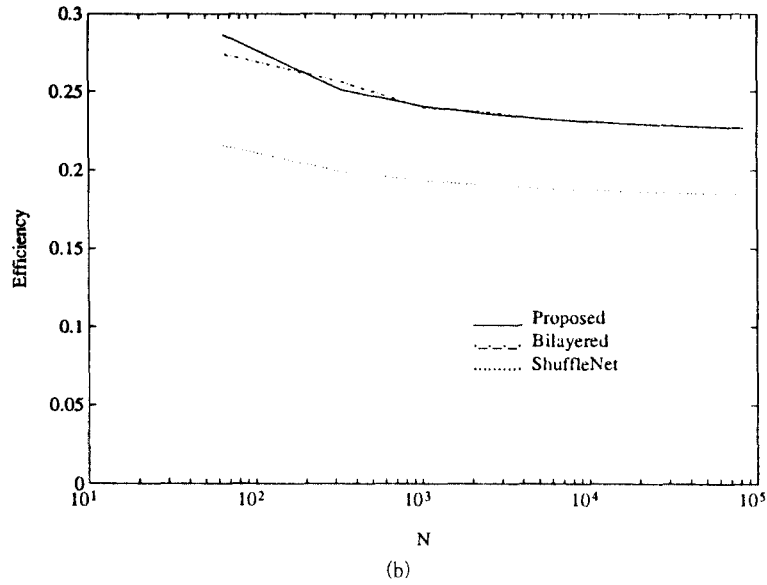
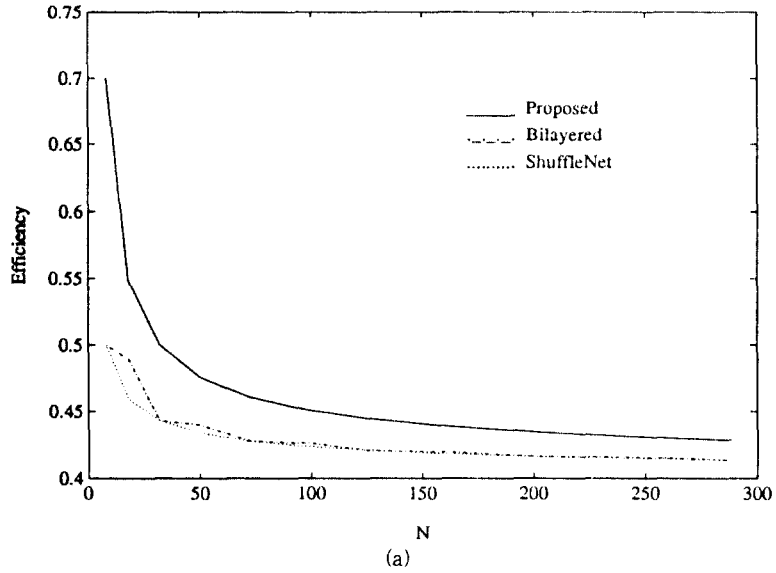


그림 9. 효율 그래프 : (a) k가 4의 배수가 아닐때(k=2), (b) k가 4의 배수 일때 (k=4)  
 Figure 9. The graph of the efficiency : (a)  $k \bmod 4 \neq 0$  ( $k=2$ ), (b)  $k \bmod 4 = 0$  ( $k=2$ )

4.4 수율 (Throughput)

토폴로지의 성능을 비교하기 위한 중요한 기준의 하나는 얼마나 많은 데이터를 전송할 수 있는지를 나타내는 수율이다. 멀티홉 네트워크에서 수율을 조사하기 위해 몇

가지 변수를 다음과 같이 정의한다.

$\gamma$  : 신호 발생율

$E$  : 평균 홉수

- $\lambda$  : 유효 신호 발생율 =  $\gamma \cdot E$
- $n$  : 비계층 링크의 개수
- $C$  : 한 파장의 채널 용량
- $C_{vi}$  : 비계층 링크의 용량
- $C_{tot}$  : 전체 네트워크 용량 =  $n \cdot C_{vi}$
- $\sigma$  : 노드당 수율 (throughput per node)

네트워크에서의 신호 발생율(arrival rate)을  $\gamma$ 라고 정의할 때, 발생한 신호가 전송이 완료되기까지 평균 흡수만큼 파장을 바꾸어 재전송을 해야하므로 유효 신호 발생율은  $\gamma \cdot E$ 가 된다. 채널을 공유하지 않을 경우에 비계층 링크 하나에 파장을 하나씩 할당하므로, 비계층 링크의 채널 용량과 파장의 채널 용량은 같다( $C_{vi}=C$ ). 전체 네트워크에  $n$ 개의 비계층 링크가 있으므로, 전체 네트워크 용량  $C_{tot}$ 은  $n \cdot C_{vi}$ 과 같다.

전체 네트워크 용량을 초과하는 신호 발생에 대해서는 전송이 불가능하므로, 전체 네트워크 용량이 유효 신호 발생율의 상한선이 된다.

$$\lambda < C_{tot} = n \cdot C_{vi} \tag{11}$$

여기에  $\lambda = \gamma \cdot E$ 를 대입하여 정리하면, 식(12)를 얻을 수 있다.

$$\gamma < \frac{n \cdot C_{vi}}{E} \tag{12}$$

전체 수율(total throughput)의 최대값은 최대 신호 발생율과 같고, 노드당 수율은 전체 수율을 노드 수로 나눈 것이다.

$$\begin{aligned} \gamma_{max} &= \frac{nC_{vi}}{E} \\ \sigma_{max} &= \frac{nC_{vi}}{EN} \end{aligned} \tag{13}$$

식(13)을 이용하여 각 토폴로지의 최대 수율 식을 구해본다. 여기서  $E_{sh}$ ,  $E_{bi}$ ,  $E_{asym}$ 은 각각 서플넷, 이중층 서플넷과 제안한 서플넷의 평균 흡수를 의미한다. 서플넷 토폴로지일때,

$$\begin{aligned} n &= \rho N \\ E &= E_{sh} \\ \sigma &= \frac{n \cdot C_{vi}}{EN} = \frac{\rho C}{E_{sh}} \end{aligned} \tag{14}$$

이고, 이중층 서플넷일 경우에는

$$\begin{aligned} n &= 2\rho N \\ E &= E_{bi} \\ \sigma &= \frac{2\rho C}{E_{bi}} \end{aligned} \tag{15}$$

이며, 제안하는 토폴로지에서는

$$\begin{aligned} n &= 2\rho N \\ E &= E_{asym} \\ \sigma &= \frac{2\rho C}{E_{asym}} \end{aligned} \tag{16}$$

이다.

식(14), 식(15), 식(16)을 사용하여 (2, 3) 토폴로지의 최대 수율을 비교한 것을 표 2에 나타내었다. 제안한 토폴로지는 기존의 서플넷보다 2배의 채널을 사용하므로 최대 수율이 2배 이상을 되어야 성능이 향상된 것인데, 표 2에서 볼 수 있듯이 거의 3배 정도로 최대 수율이 향상되었음을 알 수 있다. 또한 같은 수의 채널을 쓰는 이중층 서플넷보다도 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

표 2. (2, 3) 토폴로지 성능 비교 (N=24)

Table 2. The performance comparison of (2, 3) topology (N=24)

Topology	Total Throughput (Gb/s)	User Throughput (Mb/s)	Delay (E[hops])
Conventional	14.71	613	3.261
Bilayered	40.90	1704	2.348
Proposed Topology	43.30	1804	2.217

표 3. (3, 4) 토폴로지 성능 비교 (N=324)

Table 3. The performance comparison of (3, 4) topology (N=324)

Topology	Total Throughput (Gb/s)	User Throughput (Mb/s)	Delay (E[hops])
Conventional	229.4	597	5.0217
Bilayered	590.9	1539	3.8994
Proposed Topology	578.7	1507	3.9814

표 3에서는 (3, 4) 토폴로지의 경우에 대해서 최대 수율을 보여준다.  $p$ 가 홀수이고  $k$ 가 4의 배수일 때는 이중층보다는 근소한 차로 성능이 떨어지나 기존의 셔플넷의 3배 정도의 수율을 보여준다. 표 2와 표 3에서 채

널 용량  $C$ 는 모두 1[Gb/s]로 같다고 가정했다.

그림 10.a는  $p$ 가 2일때  $k$ 를 변화시켜가면서 수율을 보여주는 것으로 공평한 비교를 위해 기존의 셔플넷보다 2배의 채널을 쓰는 제안한 토폴로지와 이중층 셔플넷의

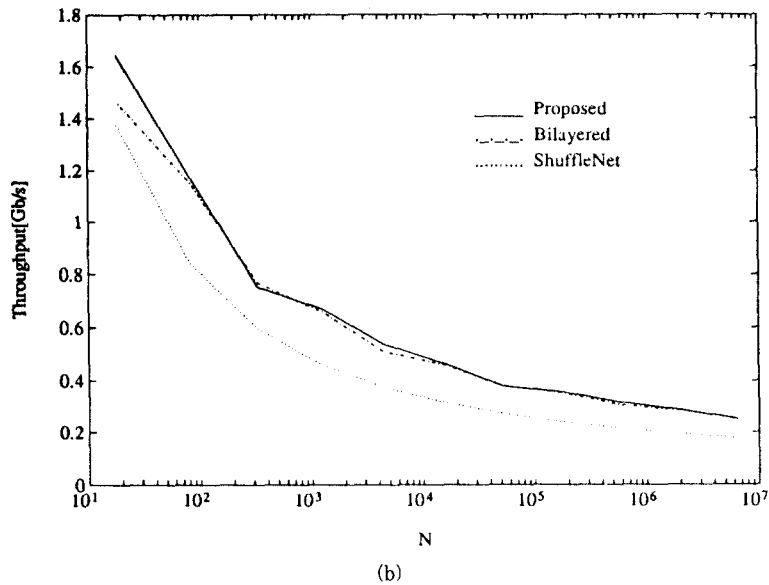
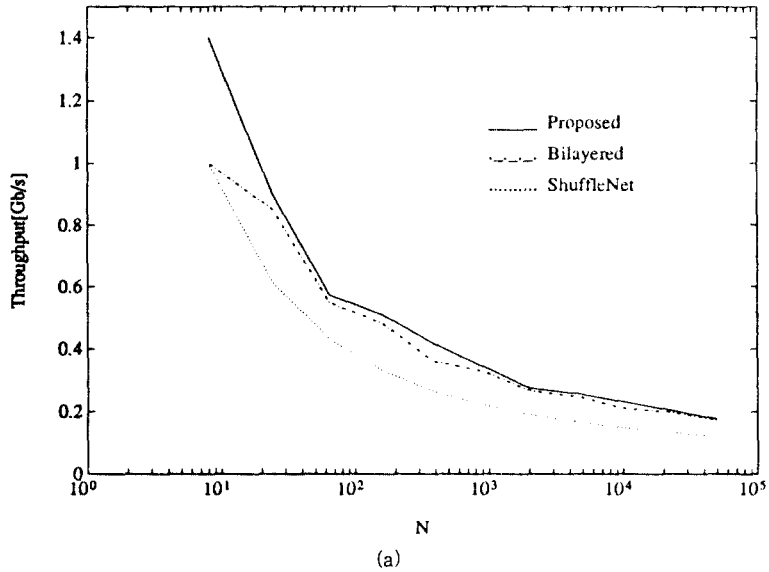


그림 10. Throughput : (a)  $p$ 가 짝수 일때( $p=2$ ), (b)  $p$ 가 홀수 일때( $p=3$ )  
 Figure 10. The graph of the throughput : (a)  $p$  is even( $p=2$ ), (b)  $p$  is odd( $p=3$ )

최대 수용은 2로 나는 것을 그렸다. 그림 10.a는 p가 짝수일 때 k를 변화시켜가면서 최대 수용을 보여주는 것으로 제안한 토폴로지가 기존의 토폴로지들 보다 성능이 향상되었음을 보여주며, 그림 10.b는 p가 홀수일 때를 보여주는 것으로 k가 4의 배수일 때만 이중층 서플넷보다 큰 소한 차로 성능이 나빠지는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 일부 구간(p가 홀수이고, k가 4의 배수인 구간)을 제외하고는 제안한 토폴로지의 최대 수용이 가장 큰 것을 알 수 있다. 그림 10에서도 채널 용량 C는 모두 1[Gb/s]로 같다고 가정했다.

#### 4.5 시간 지연

멀티홉 네트워크에서의 시간 지연은 평균 홉수 E에 비례한다<sup>8,10)</sup>. 멀티홉 네트워크 시스템에서 시간 지연은 다음의 세가지 요인에 의해서 발생한다. 첫째로, 전송을 시작하기 전에 채널을 할당받기 위해 기다리는 대기시간과 둘째로 전송을 할 때 신호가 진행해 나가는 데 소요되는 진행 시간(propagation time)과 셋째로 프로세싱 지연(processing delay)이 있다. 이 중에서 시간 지연에 주된 요소로 작용하는 진행 시간과 프로세싱 지연이 모두 평균 홉수에 비례하므로, 멀티홉 네트워크에서 전체 시간 지연은 평균 홉수에 비례한다고 볼 수 있다<sup>8,10)</sup>. 제안한 토폴로지가 기존의 토폴로지들에 비해 평균 홉수가 적고, 전체 시간 지연은 평균 홉수에 비례하므로, 제안한 토폴로지의 시간 지연 특성은 기존의 토폴로지들에 비해 개선됨을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 WDM 멀티홉 네트워크에 대해 알아보고, 새로운 토폴로지를 제안하였다. 최대 홉수와 평균 홉수를 구하고, 효율, 수용과 시간 지연을 계산하여 기존의 토폴로지들과 성능을 비교하였다. 제안한 토폴로지가 효율, 수용과 시간 지연의 측면에 있어서 기존의 모든 토폴로지들에 비해 성능이 개선되었음을 확인하였다.

제안한 토폴로지는 광대역 서비스를 위한 광 통신망을 구현하기 위한 논리적 토폴로지로서 응용될 수 있다. 광 CATV, 광 LAN과 궁극적으로는 광가입자망에까지 응용이 될 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

1. Kiyoshi Nosu, Hiromu Toba, Kyo Inoue and Kazuhiro Oda, "100 Channel Optical FDM Topology and its Applications to Optical FDM Channel-Based Networks," *IEEE J. Lightwave Tech...* vol. 11, no.5/6, pp.764-776, May/June, 1993.
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. 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.
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. 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.
7. F.Ayadi, J.F.Hayes and M.Kavehrad, "Bilayered ShuffleNet : A New Logical Configuration for Multihop Lightwave Networks," *GLOB-COM'93 Conf. Proc.*, pp.1159-1163, 1993.
8. H.K.Han and Y.K.Jhee, "A WDM Channel Sharing Scheme for Multihop Lightwave Networks Using Logically Bidirectional Perfect Shuffle Interconnection Pattern," *IEICE Trans. Comm.*, vol. E77-B, no.9, pp.1152-1161, September 1994.
9. R.J.Vetter, D.H.C.Du, "Distributed Computing with High-Speed Optical Networks," *IEEE Computer*, vol.26, no.2, pp.8-18, Feb, 1993.
10. M.Kovacevic and M.Gerla, "On the

Performance of Shared-Channel Multihop Lightwave Networks," *INFOCOM'94 Conf. Proc.*, pp.544-551, 1994.

11. A.S.Acampora, "A Multichannel Multihop Local Lightwave Network," *GLOBECOM'87 Conf. Proc.*, pp.1459-1467, Nov. 1987.

池尹圭(Yoon Kyo Jhee)

정희원

현재 : 이화여자대학교 전자공학과 부교수  
한국통신학회 논문지 1995년 제20권 제2호 참조



許廷源(Jeong Won Heo) 정희원

1989년 3월~1993년 2월 : 한국과학기술원 과학기술대학 전기 및 전자공학과(공학사)

1993년 3월~1995년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)

1995년 3월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 재학

※주관심 분야 : ATM, 광 통신망