

논문 2004-41SD-5-1

비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지를 이용한 파장분할다중화 링 (Wavelength Division Multiplexing Ring using Asymmetric Bilayered ShuffleNet)

지 윤 규*

(Jhee, Yoon Kyoo)

요 약

규칙적인 논리적 연결방법을 이용하면 노드에서 라우팅을 위한 프로세싱 시간이 단축되므로 고속의 네트워크에 적용이 가능하다. 규칙적인 논리적 연결방법의 하나인 셔플넷은 일반적으로 p 개의 직접 연결이 다른 노드들과 이루어진다. 그러나 우리가 제안한 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지를 이용하면 $2p$ 개의 노드들과 직접 연결되므로 더욱 용량이 증대된 파장분할방식 링을 설계할 수 있다. 이 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지를 이용하여 파장분할방식 링에 파장을 할당하는 방법을 본 논문에서 연구하였다. 필요한 파장수를 최소화하는 것을 목표로 네트워크를 최적화하였다.

Abstract

A regular logical topology requires little processing time for routing purposes which may be a desirable property for high-speed networks. Asymmetric bilayered ShuffleNet, proposed by us as a logical topology, can be used to a wavelength division multiplexing ring network to increase the network capacity compared to ShuffleNet. In this paper, asymmetric bilayered ShuffleNet is imbedded on a wavelength division multiplexing ring with the objective of minimizing the total number of wavelengths assigned.

Keywords: WDM ring, asymmetric bilayered ShuffleNet

I. 서 론

링 구조의 진보된 프로텍션 기술과 네트워크 관리의 용이성 때문에 SONET을 기반으로 하는 링 구조의 광 데이터 네트워크가 지난 10년간 많이 설치되고 있다^[1]. 현재는 주로 노드와 노드를 연결하는 광전송장비들이 사용되고 있지만 파장 라우트 네트워크(wavelength routed network)기술이 발전함에 따라 궁극적으로는 파장분할다중화(wavelength-division multiplexed(WDM)) 링 구조의 형태로 진화되어 나갈 것이다. 본 논문에서는 파장분할다중화 링 네트워크에서 비대칭 이중층 셔플넷을 이용한 파장 할당 방식을 연구하였다.

파장분할다중화 광기술을 링 네트워크에 적용하여 효과적인 망 구조를 연구하는 것은 전광(全光) 파장분할다중화 네트워크 구조에 가까운 것이다. 이것은 광네트워크노드(optical network node(ONN))에 파장 다중화기, 파장 역다중화기와 광스위치들을 사용하여 논리적 토폴로지(logical topology)가 물리적인 광 링 네트워크에 임베드될 수 있도록 하는 것이다. 논리적스위칭노드(logical switching node(LSN))에서의 패킷교환과 이 노드들간의 파장을 이용한 광경로(lightpath)의 설정으로 이루어지는 논리적 토폴로지는 광자공학과 전자공학의 장점을 모두 활용한다. 즉 논리적 토폴로지서 패킷은 가능한 한 멀리까지 광신호의 형태로 한 파장을 이용하여 전송되고 광경로와 광경로 사이의 패킷교환은 논리적스위칭노드에서의 전자교환으로 이루어진다.

이 패킷교환 논리적 토폴로지 구조는 회선교환이나 전광(全光) 패킷교환과는 달리 싱글홉(single-hop)과 멀

*정희원, 이화여자대학교 정보통신학과
(Dept. of Information Electronics Engineering, Ewha Womans University)
접수일자: 2004년1월20일, 수정완료일: 2004년4월22일

티홉(multi-hop)의 조합으로 구성되어 있다. 싱글홉 방식에서는 패킷이 한 홉만에 목적지 노드에 도착할 수 있으나 송신기와 수신기가 같은 시간에 같은 파장으로 조정되어야 한다^[2]. 이를 위하여 패킷을 전송하기 이전에 송수신 노드 사이에 이를 위한 협력이 필요하고 송수신기의 파장 가변 범위가 넓어야 한다. 멀티홉 방식은 트래픽 패턴의 변화나 새로운 노드의 추가 등의 특별한 경우를 제외하고는 노드들 간의 채널 할당이 상대적으로 고정되어 있다. 그러나 패킷이 중간 노드를 거쳐서 목적지 노드에 도달하므로 홉수를 최소화시키는 것이 중요하다. 파장분할다중화 링 네트워크에서 특정한 파장으로 연결된 광경로(lightpath)는 싱글홉이고 광경로 사이는 논리적스위칭노드를 이용하여 멀티홉으로 연결한다^[3-5]. 이와 같은 구조를 택하는 이유는 네트워크에 있는 모든 사용자를 직접 광경로로 연결하기에는 사용 가능한 파장 수가 제한되어 있기 때문이다. 이 구조에서 파장분할다중화 방법을 사용하면 파장을 공간적으로 다시 사용하도록 하는 기능이 있어 시스템 용량을 증가시키는 효과가 있다.

이와 같은 논리적 토폴로지에서 규칙적인 연결방법을 사용하면 노드에서 라우팅을 위한 프로세싱 시간이 단축되므로 고속의 네트워크에 적용이 가능하다. 규칙적인 논리적 연결방법의 하나인 셔플넷은 일반적으로 p 개의 연결이 다른 노드들과 직접 이루어진다. 그러나 이는 충분한 연결 경로를 제공하지 못하여 지연 시간이 길어지고 따라서 수율(throughput)이 감소하게 된다. 이를 보완하기 위하여 우리가 제안한 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지(asymmetric bilayered ShuffleNet)^[6]를 이용하면 $2p$ 개의 노드들과 동시에 연결되므로 더욱 효과적인 파장분할다중화 링 네트워크를 구현할 수 있다. 이 비대칭 이중층 셔플넷 토폴로지를 이용하여 물리적 링 토폴로지에 논리적 토폴로지를 임베딩(imbedding)하는 방법을 본 논문에서 연구하였다. 사용하는 파장수를 최소화하는 것을 목표로 파장분할다중화 링 네트워크를 설계하였다.

본 논문에서는 셔플넷에 비하여도 평균 홉수를 줄일 수 있는 방법인 비대칭 이중층 셔플넷을 이용하여 파장분할다중화 링 네트워크를 구현하는 방법을 제시한다. 셔플넷을 변형한 비대칭 이중층 셔플넷은 평균 홉수를 줄여 효율을 높임과 더불어 지연시간도 줄일 수 있음을 성능평가를 통하여 확인하였다^[2]. 비대칭 이중층 셔플넷을 8개의 노드를 지닌 파장분할다중화 링 네트워크에 사용한 결과 셔플넷의 경우와 비교하여 시스템의 복잡

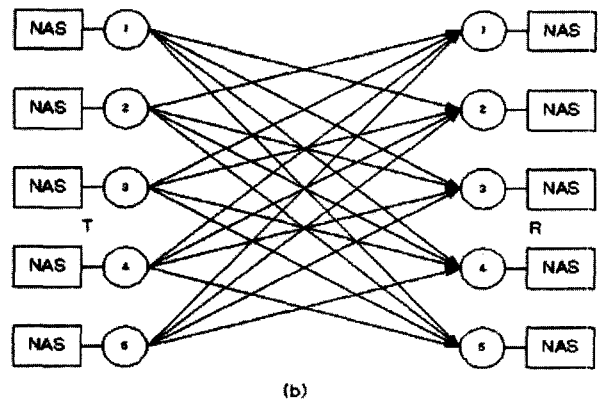
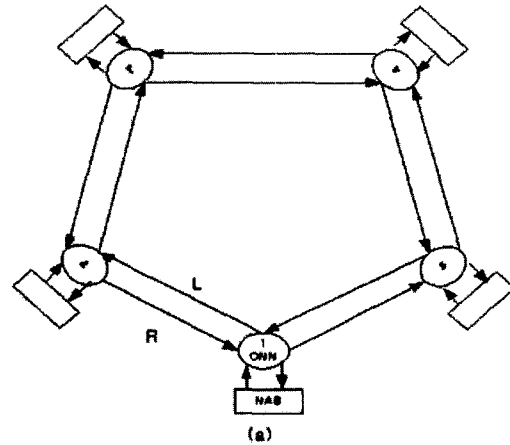


그림 1. 5 개 노드로 구성된 양방향 파장분할다중화 링 네트워크

Fig. 1. Bidirectional WDM ring containing five nodes.

도에 비해 시스템 용량이 더욱 증가함을 알 수 있다. 이를 위하여 II장에서는 비대칭 이중층 셔플넷을 이용한 파장분할다중화 링 네트워크를 구현하는 방법을 제시한 뒤 III장에서 결론을 맺는다.

II. 비대칭 이중층 셔플넷을 이용한 파장분할다중화 링 네트워크 설계

우선 그림 1-a과 같이 5 개의 노드를 갖는 양방향 파장분할다중화 링 네트워크를 고려해 보자. 모든 노드와 노드간의 직접 연결을 필요로 하는 경우에 파장할당을 생각해 보면 각 노드마다 나머지 4개의 노드와 직접 연결하는 4개의 파장이 필요함을 알 수 있다. 각 광네트워크노드(ONN)와 NAS(network access station)사이 한 쌍의 광파이버를 이용하여 연결할 경우를 고려하면 이 연결을 위한 OCG(optical connection graph)는 그림 1-b와 같이 되고 이것은 결국 OCG에서 연결선색칠(edge-coloring) 문제에 해당된다. 즉 광채널에서 사용하지 않는 파장을 선택하는 것은 동일한 끝점에 연결되

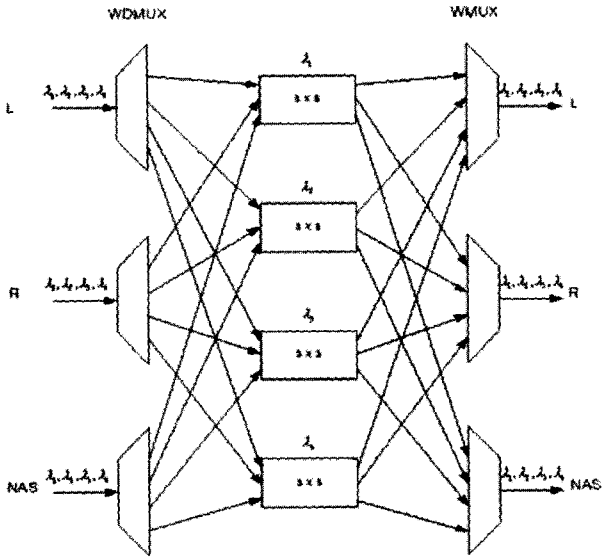


그림 2. 5 개 노드로 구성된 양방향 파장분할다중화 링 네트워크에서의 광네트워크노드
Fig. 2. Optical Network Node for bidirectional WDM ring containing five nodes.

는 선들을 서로 다른 색깔로 칠하는 것과 같다. 파장분할다중화 링 네트워크에서는 연결선색칠을 만족하는 것은 단지 필요조건에 해당하므로 광노드들을 직접 연결하는 광파이버에서 서로 다른 광채널들이 할당되도록 주의해야 한다.

이 파장분할다중화 링 네트워크에서 각 광네트워크노드(ONN)들은 그림 2와 같이 세 개의 입력(L, R, NAS)과 세 개의 출력(L, R, NAS)을 지니는 WSX C(wavelength-selective cross-connect)로 구성할 수 있다. 각 NAS, L 또는 R로부터 네 개의 신호가 파장분할다중화되어 광파이버를 통하여 광네트워크노드에 연결되고 네 개의 파장분할다중화된 신호는 광 네트워크노드에서 cross-connect된 후에 NAS, L 또는 R로 연결된다. 이 연결은 한 쌍으로 이루어진 광파이버를 통하여 이루어지므로 각 광파이버속에는 서로 다른 파장들로 이루어진 4개의 광채널이 있다.

위에 주어진 문제의 경우 최단 경로 라우팅(shortest path routing) 알고리즘을 사용하여 각 광채널 연결을 위해 파장을 할당하면 <표 1>과 같이 나타낼 수 있다. <표 1>에서 nL 은 해당 연결이 L링으로 λ_n 을 사용하여 연결됨을 의미한다. 최단 경로 라우팅 알고리즘은 각 연결이 L 또는 R 링을 통하여 최소의 광 홉(optical hop)으로 이루어지도록 설정함을 의미한다. 여기서 광 홉은 거치는 광네트워크노드의 개수에 하나를 더한 값이다.

표 1. 5개의 노드간 직접 연결을 위한 파장 할당
Table 1. Wavelength assignment for a fully connected bidirectional WDM ring containing five nodes.

		Destination				
		1	2	3	4	5
Source	1	X	1L	2L	3R	4R
	2	1R	X	3L	4L	2R
	3	3R	4R	X	2L	1L
	4	4L	2R	1R	X	3L
	5	2L	3L	4R	1R	X

위에서 설명한 방법으로 모든 노드를 광채널로 직접 연결하도록 설정하려면 노드의 수가 증가함에 따라 많은 수의 파장이 필요하게 되고 따라서 광시스템의 복잡도도 증가하게 된다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 논리적 토폴로지(logical topology)를 사용할 수 있다. 논리적 토폴로지란 광네트워크 상위에 논리적 스위칭을 사용하여 고가의 광 시스템의 구조를 단순하게 함으로 가격을 낮추는 효과를 얻을 수 있는 방법이다. 이 방법에서는 패킷이 전달되는 중간에, 광네트워크노드뿐 아니라, 패킷의 주소들을 체크할 수 있는 전자적인 논리적 스위칭 노드들을 두게 된다. 따라서 지연시간을 줄이기 위하여 평균 홉수를 줄이는 것이 필요하다. 이를 위한 논리적 토폴로지는 다양한 형태로 구현할 수 있는데 규칙적인 논리적 토폴로지를 사용하면 관리 측면에서 편리하다. 그 예로는 셔플넷이 대표적이다. 이를 사용하면 각 스테이션의 장비에 사용되는 송수신기의 개수가 줄어들뿐만 아니라 좋은 성능을 보이며 큰 규모의 네트워크로 확장시킬 수 있다.

그림 3-a에 8개의 노드를 가진 셔플넷 논리 토폴로지를 보여주고 있다. 셔플넷 토폴로지는 이름이 의미하는 것처럼 카드를 섞는 것과 유사한 방식으로 노드들을 연결한다. 각 열은 4개의 논리적 스위칭 노드(logical switching node(LSN))로 구성되어 있고 두 개의 열로 구성된 노드들은 단 방향 링크로 연결되어 있다. 8개의 노드들 전체를 상호간에 직접 연결하기 위해서는 56개의 광링크가 필요하나 셔플넷 논리 토폴로지를 사용하여 멀티홉으로 연결하면 단지 16개의 광링크가 필요함을 볼 수 있다. 트래픽의 흐름을 나타내기 위하여 마지막 열에 처음 열을 반복하여 그러 원통 모양임을 표시하였다. 이 그림으로 LAN을 연결하는 경우를 예로 들면 각 논리적 스위칭 노드들은 두 가지 기능을 수행한

다. 그 중 하나의 기능은 패킷의 주소가 이 노드와 연결된 단말기의 주소와 일치하면 패킷들을 단말기로 보내고 또한 단말기로부터 패킷을 받아 네트워크로 연결시키는 기능이다. 또 하나의 기능은 패킷의 주소가 이 노드와 연결된 단말기의 주소와 일치하지 않을 때에 이 패킷을 다른 노드로 보내는 중계기능이다. 중계 노드를 거치는 경우까지 포함하면 모든 단말기간의 연결이 가능해지며 이 때 최대 홉수는 3이 됨을 알 수 있다. 균일한 트래픽과 최단 경로 라우팅 알고리즘을 사용할 경우 이 네트워크에서 평균 홉수는 2가 된다. 이 네트워크는 열의 수를 증가시키거나 각 노드와 연결되는 링크의 수를 증가시킴으로써 규모를 확장할 수 있다.

셔플넷보다 시스템 용량을 증가시키기 위하여 사용하는 비대칭 이중층 셔플넷의 연결 방법은 다음과 같다. 우선 각 열을 홀수번째 행의 그룹과 짝수번째 행의 그룹으로 분리한다. 오른쪽 방향의 경로는 홀수행에 있는 노드에만 셔플넷 방식으로 연결되게 하고 왼쪽 방향의 경로는 짝수행에 있는 노드에만 역시 셔플넷 방식으로 연결되게 한다. 이와 같은 연결 방법을 8-node (2, 2) 비대칭 이중층 셔플넷에 적용하면 그림 3-b와 같다. 즉, 첫 번째 열에 있는 1번 노드에서 오른쪽으로 연결 시에는 두 번째 열에 있는 홀수 번째 노드인 5번 노드와 7번 노드로 연결된다. 1번 노드에서 왼쪽으로 연결 시에는 두 번째 열의 짝수 번째 노드인 6번 노드와 8번 노드로 연결된다.

이와 같은 방법을 일반화 시키면, 각 열에 있는 p^k 개 노드에서 p 개의 링크가 각 노드에서 다음 열로 연결되고 또한 p 개의 링크가 각 노드에서 이전의 열로 연결되는 방법이다. 즉 왼쪽열에서 오른쪽열로 연결될 때는 왼쪽열의 i 와 $i+1$ 번째 노드는 오른쪽열의 $j, \dots, j+2(p-1)$ 번째와 연결된다. 오른쪽열에서 왼쪽열로 연결될 때는 오른쪽열의 i 와 $i+1$ 번째 노드는 왼쪽열의 $j+1, \dots, j+1+2(p-1)$ 번째와 연결되는데 여기서 i 는 홀수이고 $j=[(i-1) \bmod p^{k-1}]p+1$ 이다. 여기서 p 는 한 노드에서 다음 열에 연결되는 노드의 개수를 나타내고, k 는 열의 수를 나타낸다.

이 셔플넷 논리 토폴로지와 비대칭 이중층 셔플넷을 양방향 파장분할다중화 링 네트워크에 적용하여 파장을 할당해 보자. 셔플넷 논리 토폴로지를 적용한 경우에, 필요한 파장의 수를 최소화하도록 각 노드의 위치를 정한 것을 그림 4에 나타내었다. 각 노드를 연결하는 링크는 화살표로 표시한 한 쌍의 양방향 광파이버로 구성

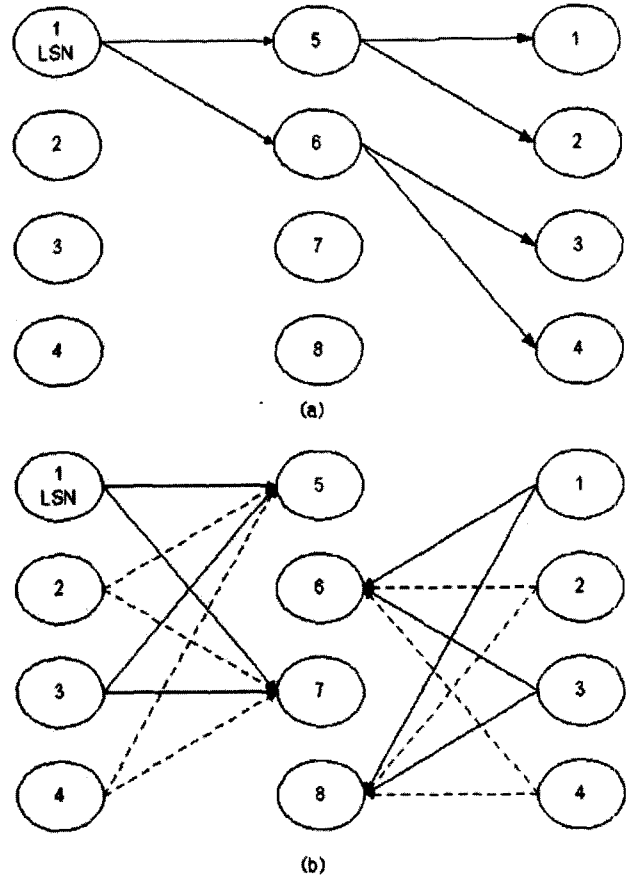


그림 3. 8-node (2, 2) 셔플넷(a)과 비대칭 이중층 셔플넷 (b)의 연결 방법
 Fig. 3. Connection graph for a 8-node (2, 2) Shuffle Net(a) and asymmetric bilayered ShuffleNet(b).

되었다. 파장 할당 결과와 방향은 <표 2>에 나타나 있다. 한 예로 파장 λ_1 을 사용하여 왼쪽 방향으로 보내는 경우를 그림 4에 그렸다. 1번 노드에서 5번 노드로 λ_1 을 사용하여 보내고 동시에 7번 노드에서 2번 노드로 λ_1 을 사용하여 보내도 그림 4가 보여주는 바와 같이 중복되는 경우가 발생하지 않는다. 그 결과는 16개의 광채널에 단지 2개의 파장을 사용하여 할당하였고 공간 재사용 계수는 8이 된다. 이 네트워크의 전체 용량은 $8R_0$ bps가 되는데 여기서 R_0 는 송신기 한 개의 전송속도이다. 이와 같이 전체 용량이 16개의 송신기의 용량을 합한 것보다 1/2 배로 적은 이유는 이 네트워크의 평균 홉수가 2이기 때문이다. 8개의 노드들이 광채널로 직접 연결되어 있는 경우는 56개의 광채널이 필요하고 이를 링구조에서 구현하기 위해서는 전체적으로 8개의 파장과 각 스테이션마다 7개의 송수신기가 요구된다. 이와 같이 구현하면 전체적인 네트워크 용량은 $56R_0$ 가 된다.

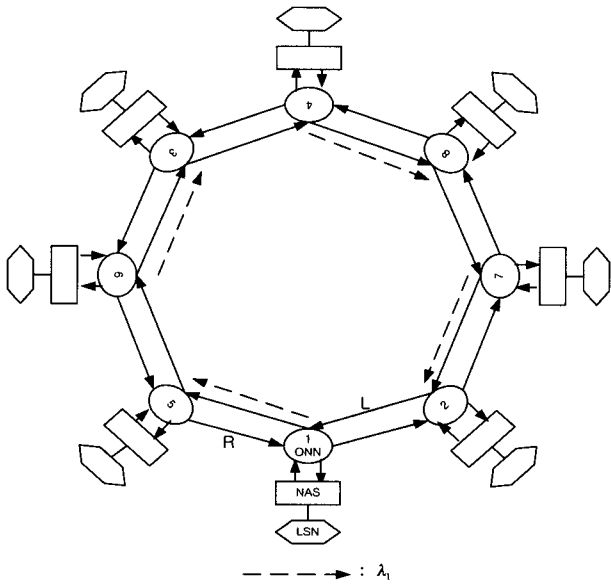


그림 4. 8개의 노드간 셔플넷 연결을 위한 파장분할다중화 링 구조
 Fig. 4. Bidirectional WDM ring for ShuffleNet embedding containing eight nodes.

표 2. 8개의 노드간 셔플넷 연결을 위한 파장 할당
 Table 2. Wavelength assignments for ShuffleNet embedding containing eight nodes.

		Destination							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Source	1	X				1L	2L		
	2		X					1R	2R
	3			X		2R	1R		
	4				X			2L	1L
	5	1R	2R			X			
	6			1L	2L		X		
	7	2L	1L					X	
	8			2R	1R				X

본 논문에서 제시하는 비대칭 이중층 셔플넷의 연결 방법을 링 토폴로지에 적용하여 파장 할당을 한 경우는 그림 5와 같은 노드 위치를 갖는다. 이 경우 파장 할당 결과와 방향이 <표 3>에 나타나 있다. 역시 파장 λ_1 을 사용하여 왼쪽 방향으로 보내는 경우를 그림 5에도 그렸다. 1번 노드에서 2번 노드로 λ_1 을 사용하여 보내고 동시에 7번 노드에서 8번 노드로 λ_1 을 사용하여 보내도 그림 5가 보여주는 바와 같이 중복되는 경우가 발생하지 않는다. 그 결과는 32개의 광채널에 4개의 파장을 사용하여 할당하였고 공간 재사용 계수는 8이 된다. 이 연결 방법에서 광네트워크노드의 구조는 그림 2와 일치한다. NAS에 위치한 송신기에서 4개의 신호들

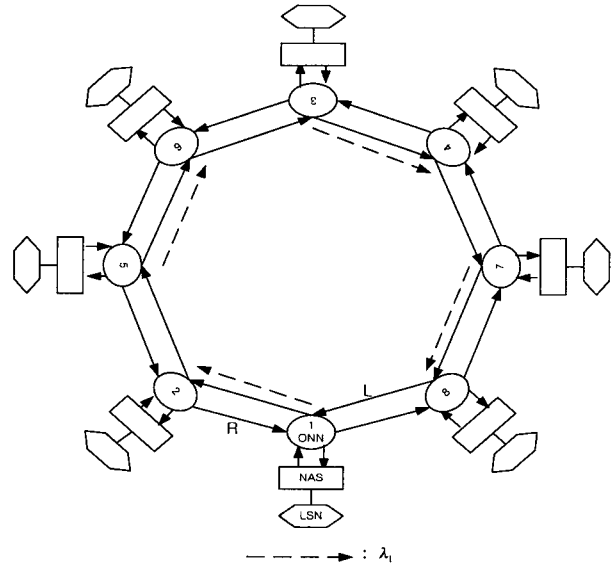


그림 5. 8개의 노드간 비대칭 이중층 셔플넷 연결을 위한 파장분할다중화 링 구조
 Fig. 5. Bidirectional WDM ring for asymmetric bilayered ShuffleNet embedding containing eight nodes.

표 3. 8개의 노드간 비대칭 이중층 셔플넷 연결을 위한 파장 할당
 Table 3. Wavelength assignments for asymmetric bilayered ShuffleNet embedding containing eight nodes.

		Destination							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Source	1	X				1L	2L	4R	3R
	2		X			3L	4L	2R	1R
	3			X		2R	1R	3L	4L
	4				X	4R	3R	1L	2L
	5	4R	2R	3L	1L	X			
	6	3R	1R	4L	2L		X		
	7	1L	3L	2R	4R			X	
	8	2L	4L	1R	3R				X

이 4개의 서로 다른 파장에 실려 하나의 광섬유를 통하여 광네트워크노드의 입력으로 들어온다. 이 NAS로부터 들어온 신호들은 L방향 광파이버와 R방향 광파이버로 들어온 신호들과 그림 2가 보여주는 바와 같이 광네트워크노드에 있는 파장 역다중화기에서 각각의 신호를 분리된 다음 광 스위치를 통한 후에 다시 파장다중화기에서 다중화되어 하나의 광섬유를 통하여 수신 광네트워크노드로 중계되거나 이 광네트워크노드에 연결된 NAS로 전달된다. 각 광네트워크노드는 12개의 입력과 12개의 출력이 있고 각 광파이버에는 4개의 신호들이 파장다중화되어 있다.

그림 6에 1번 노드의 구조를 나타내었다. 그림 6-a는

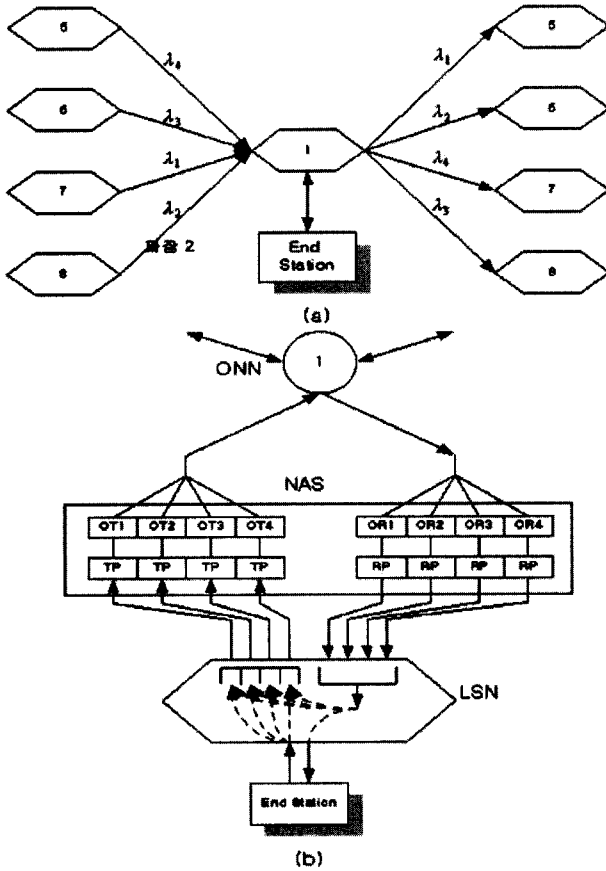


그림 6. 8개의 노드간 비대칭 이중층 셔플넷 연결을 위한 WDM 링 노드의 구조
 Fig. 6. A WDM ring node structure for an 8-node(2, 2) asymmetric bilayered ShuffleNet embedding.

1번 노드가 입력 트래픽을 5,6,7,8번 노드와 터미널로부터 받아 목적지 주소가 터미널 주소와 일치할 때 터미널로 보내고 그렇지 않은 경우에는 5,6,7,8번 노드로 중계함을 보여준다. 7(8,6,5)번 노드부터 파장 λ_1 ($\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$)에 실려 논리적스위칭노드에 들어오는 패킷은 그림 6-b에서 보여주는 바와 같이 버퍼에 저장되어 목적지 주소를 검사한다. 목적지 주소가 이 논리적스위칭노드에 연결된 터미널과 같으면 패킷을 터미널로 보내고 목적지 주소가 터미널 주소와 일치하지 않는 경우에는 다음 노드의 주소에 따라 4개의 버퍼로 나누어 저장한 후에 각각 연결된 송신기로 보내진다. 다음 노드가 5(6,8,7)번인 패킷은 1(2,3,4)번 송신기로 보내져서 파장 λ_1 ($\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$)으로 5(6,8,7)번 노드로 연결된다. 이 네트워크의 전체 용량은 $22.4 R_0$ bps가 되는데 여기서 R_0 는 송신기 한 개의 전송속도이다. 이와 같이 전체 용량이 모든 송신기의 용량을 합한 것보다 7/10 배로 적은 이유는 이 네트워크의 평균 흡수가 10/7이기

때문이다. 결과적으로 셔플넷을 이용한 방법보다 시스템의 복잡도는 두 배 증가한데 비해 시스템 용량은 2.8 배 증가함을 알 수 있다.

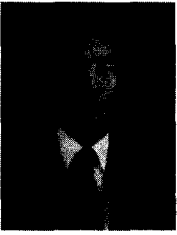
III. 결 론

본 논문에서는 파장분할다중화 링 네트워크에서 비대칭 이중층 셔플넷을 이용하여 파장을 할당하는 방법을 연구하였다. 전체 노드를 직접 연결하는 방법은 송수신기의 복잡도가 노드 수의 증가에 따라 급격히 증가한다. 반면 셔플넷을 이용하여 멀티홉으로 파장을 할당하면 송수신기의 복잡도는 직접 연결하는 경우에 비하여 감소나 네트워크의 전체적인 용량도 감소하게 된다. 이의 장단점을 보완하기 위하여 비대칭 이중층 셔플넷을 이용하여 파장을 할당하면, 셔플넷을 이용하는 경우보다, 송수신기의 복잡도는 두 배로 증가하나 네트워크의 용량은 두 배 이상으로 증대하는 것을 파장분할다중화 링 네트워크를 통하여 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Stern, T.E. and Bala, K., Multiwavelength Optical Networks. Addison Wesley, 1999.
- [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] F. Ayadi, J.F. Hayes and M. Kavehrad, "Bilayered ShuffleNet : A New Logical Configuration for Multihop Lightwave Networks," GLOVECOM'93 Conf. Proc., pp. 1159-1163, 1993.
- [5] 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, Sep. 1994.
- [6] 지윤규, 심현정, "WDM 멀티홉 광통신망을 위한 하나 걸린 행과 연결된 이중층 셔플넷 토폴로지," 한국통신학회논문지 제22권 5호, pp.1064-1074, May 1997.

저 자 소 개



지 윤 규(정회원)

1978년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.

1980년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.

1984년 The University of Texas
at Austin 전자공학과
박사 졸업.

<주관심분야 : 광통신, 광대역통신>

