

論文2002-39SD-6-3

하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷 토폴로지를 이용한 광 Wide-Area 네트워크 설계

(Design of a Wide-Area Optical Network using
Asymmetric Bilayered ShuffleNet)

池 尹 圭 *

(Yoon Kyoo Jhee)

요 약

규칙적인 가상 연결방법을 이용하면 노드에서 라우팅을 위한 프로세싱 시간이 단축되어 고속의 네트워크에 적용이 가능하다. 규칙적인 가상 연결방법의 하나인 셔플넷은 일반적으로 p개의 연결이 다른 노드들과 이루어진다. 그러나 우리가 제안한 하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷 토폴로지를 이용하면 2p개의 노드들과 동시에 연결되므로 더욱 효과적인 광역 통신망에 적용할 수 있다. 이 하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷 토폴로지를 이용하여 물리적 토폴로지에 가상 토폴로지를 imbedding하는 방법을 본 논문에서 연구하였다. 전체 지연 시간을 최소화하는 것을 목표로 네트워크를 최적화하였다.

Abstract

A regular virtual 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 virtual topology, can be more efficient to be used to design a wide-area optical network compared to ShuffleNet. In this paper, asymmetric bilayered ShuffleNet is imbedded on a given physical topology with the objective of minimizing the total message delay.

Key Words : wide-area optical network, asymmetric bilayered ShuffleNet

I. 서 론

본 논문에서는 파장 분할 다중화 방식(wavelength division multiplexing) 광기술을 광역에 걸친 네트워크에 적용하여 효과적인 망 구조를 연구하는 것을 목표로 한다. 이것은 전광(全光) WDM 네트워크 구조에 가까운 것으로써 라우팅 노드에 파장 다중화기, 파장 역 다중화기와 광스위치들을 사용하여 가상 토폴로지

(virtual topology)가 물리적인 광파이버 네트워크에 imbedding될 수 있도록 하는 것이다. 광경로(lightpath)의 설정과 패킷교환으로 이루어지는 가상 토폴로지는 광자공학과 전자공학의 장점을 모두 활용한다. 즉 가상 토폴로지에서 패킷은 가능한 한 멀리까지 광신호의 형태로 동일한 파장을 이용하여 전송되고 광경로와 광경로사이의 패킷교환은 전자교환으로 이루어진다.

이 패킷교환 가상 토폴로지 구조는 전광(全光) 패킷교환이나 회선교환과는 달리 single-hop과 multi-hop의 조합으로 구성되어 있다. 이 아키텍처에서 광경로(lightpath)는 single-hop에 해당되고 광경로 사이를 multi-hop으로 연결하는데 이와 같은 구조를 택하는 이유는 네트워크에 있는 모든 사용자를 광경로로 연결

* 正會員, 梨花女子大學校 情報通信學科

(Dept. of Information Electronics Engineering, Ewha Womans University)

接受日字:2002年3月2日, 수정완료일:2002年6月5日

하기에는 사용 가능한 파장 수가 제한되어 있기 때문이다. 이 구조에서는 수동성형 소자 대신에 파장 다중화기를 사용하는데 이는 파장을 공간적으로 다시 사용하도록 하는 기능이 있어 시스템 용량을 증가시키는 효과가 있다.

이와 같은 가상 토폴로지에서 규칙적인 연결방법을 사용하면 노드에서 라우팅을 위한 프로세싱 시간이 단축되어 고속의 네트워크에 적용이 가능하다. 규칙적인 가상 연결방법의 하나인 셔플넷은 일반적으로 p 개의 연결이 다른 노드들과 이루어진다. 그러나 이는 충분한 연결 경로를 제공하지 못하여 지연 시간이 길어지고 따라서 throughput도 감소하게 된다. 이를 보완하기 위하여 우리가 제안한 하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷 토폴로지^[1]를 이용하면 $2p$ 개의 노드들과 동시에 연결되므로 더욱 효과적인 광역 통신망에 적용할 수 있다. 이 하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷 토폴로지(asymmetric bilayered ShuffleNet)를 이용하여 물리적 토폴로지에 가상 토폴로지를 imbedding하는 방법을 본 논문에서 연구하였다. 전체 지연 시간을 최소화하는 것을 목표로 네트워크를 최적화하였다.

새롭게 개발된 기술의 현장 설치는 점진적으로 이루어지므로 이미 설치되어 있어 작동하고 있는 네트워크를 제거하고 새로운 시스템을 도입하기보다는 WDM을 활용하는 방향으로 네트워크가 진화되므로 현존하는 패킷스위치에 wavelength routing switch(WRS)를 추가하여 성능을 개선하는 방향으로 발전하여 갈 것으로 예측된다. 이와 같은 전체 아래 이를 해결하기 위한 문제를 다음과 같이 정리할 수 있다.^[2~4]

II. 하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷을 이용한 가상망 설계

바람직한 가상 토폴로지를 물리적 토폴로지(파이버 네트워크)에 imbedding시키는 방법을 서술하면 아래와 같다. 우선 이 문제에서 다음 사항들은 입력으로 주어진다.

(1) 주어지는 물리적 토폴로지 $G(p) = (V, E(p))$ 는 가중치가 있고 방향성이 없는 그래프로서 V 는 네트워크의 물리 노드의 집합을 나타내고 $E(p)$ 는 이 물리 노드들을 연결하는 링크의 집합을 표시한다. 노드는 패킷스위치와 wavelength-routing switch(WRS)를 포함하고 있는 네트워크 노드이고 링크는 물리 노드들을 연

결하는 광파이버이다. 방향성이 없는 링크라는 의미는 각 링크는 양방향 통신을 할 수 있는 광파이버로 구성되어 있다는 것이다. 링크에는 가중치가 부여되는데 이는 물리 노드들간의 거리를 의미할 수 있다. 네트워크의 물리 노드 i 는 $D(i) \times D(i)$ 의 WRS를 갖고 있고 $D(i)$ 는 물리 노드 i 의 degree라 부르며 물리 노드로 들어가고 나가는 광파이버의 수를 나타낸다.

(2) 주어지는 $N \times N$ 의 트래픽 행렬의 (i, j) 성분은 물리 노드 i 에서 물리 노드 j 로의 평균 트래픽을 의미하고 N 은 물리 노드의 개수이다.

(3) 사용되는 파장 가변 레이저와 파장 가변 필터의 수도 주어진다.

위의 값들이 주어진 상황에서 다음 값들을 정하여야 한다.

(1) 가상 토폴로지 $G(V) = (V, E(v))$ 에서 각 가상 노드의 outdegree는 송신기의 개수를 나타내고 가상 노드의 indegree는 각 가상 노드의 수신기의 개수를 의미한다. 가상 노드는 물리 노드에 해당하고 가상 노드를 연결하는 각 링크는 해당 물리 노드를 연결하는 광경로에 해당한다.

(2) 가상 토폴로지의 각 링크에 파장을 할당할 때는, 두 개의 광경로가 동일한 물리적 링크를 공유할 경우에는 반드시 서로 다른 파장을 할당하도록 해야한다.

(3) 가상 토폴로지가 결정되고 파장 할당을 수행한 이후에 WRS의 크기와 연결형태는 쉽게 구해진다.

문제의 예로 여덟 개의 노드로 구성된 그림 1과 같은 물리적 토폴로지를 가정하였다. 각 링크에 표시된 값들은 상대적인 거리를 표시하며 이 물리적인 토폴로지에 가상 토폴로지인 하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷을 mapping하고자 한다. 이와 같은 규칙적인 가상 토폴로지는 잘 정의된 구조적 패턴 때문에 라우팅을 위한 프로세싱 시간이 적게 걸리므로 초고속 네트워크에서 필요한 가상 토폴로지라고 말할 수 있다. 그 이유는 규칙적인 구조의 중계노드에서는 전체의 목적지 주소를 다 조사하는 대신에 목적지 주소의 부분집합만을 처리한 후에 패킷을 forwarding할 수 있기 때문이다.

주어진 물리적 토폴로지를 그림 2와 같은 하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷의 가상 토폴로지에 imbedding하기 위하여 다음과 같이 최적화 문제를 구성하였다. 소문자 s 와 d 는 데이터의 source와 destination을 의미하고 i 와 j 는 광경로(lightpath)가 시

작하고 끝나는 노드를 의미한다. 또한 m 과 n 은 물리적 링크의 시작점과 끝점을 나타낸다.

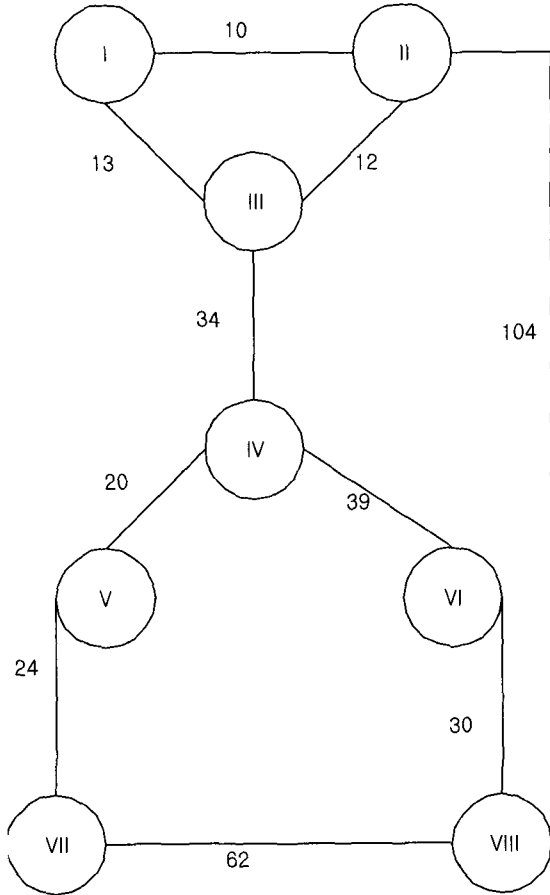


그림 1. 물리적 토폴로지
Fig. 1. Physical topology.

이 경우 다음과 같이 값들이 주어진다.

- (1) 네트워크에 있는 노드의 개수 $N=8$.
- (2) 각 광파이버 당 최대 파장수 $M=$ 제한 없음
- (3) 물리적 토폴로지에서 m 물리 노드와 n 물리 노드 사이에 광파이버 링크가 있으면 $P_{mn} = P_{nm} = 1$ 이 되고 그렇지 않으면 0이 된다. 여기서 $m, n = 1, 2, 3, \dots, 8$ 이다. 주어진 물리적 토폴로지의 광파이버 연결은 다음과 같은 행렬로 표시할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

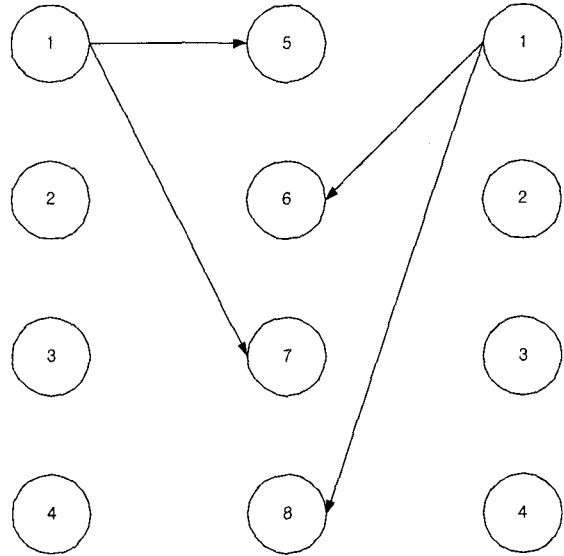


그림 2. 하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷 토폴로지
Fig. 2. Asymmetric bilayered ShuffleNet topology.

(4) 광파이버 길이 d_{mn} 은 물리 노드 m 에서 물리 노드 n 까지의 거리를 나타내고 전파 지연이 거리에 비례하므로 문제를 간단히 하기 위하여 d_{mn} 으로 propagation delay를 대신한다. 두 물리 노드간에 광파이버가 직접 연결되어 있지 않으면 $d_{mn}=0$ 으로 정의한다. 위에 주어진 문제에 대한 d_{mn} 을 행렬로 표시하면 아래와 같다.

$$\begin{pmatrix} 0 & 10 & 13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 104 \\ 13 & 12 & 0 & 34 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 34 & 0 & 20 & 39 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 39 & 0 & 0 & 0 & 30 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 24 & 0 & 0 & 62 \\ 0 & 104 & 0 & 0 & 0 & 30 & 62 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

(5) 주어진 문제에서 p 가 2이므로 i 노드의 송수신기 개수는 모두 $T_i = R_i = 4$ 가 된다.

(6) 각 노드에서 모든 노드로 송신되는 트래픽은 모두 동일하다고 가정한다. 즉 $\lambda_{sd} = 1$ 로 모두 같고 $\lambda_{ss} = 0$ 으로 정의한다.

(7) 노드 i 와 노드 j 사이에서 광경로(lightpath)가 존재하면 변수 $V_{ij} = 1$ 이 되고 그렇지 않은 경우는 $V_{ij} = 0$ 이 된다. 위의 문제에서 가상 토폴로지는 하나 걸른 행과 연결된 이중층 셔플넷으로 연결되어 있으므로 이를 행렬로 나타내면 아래와 같다.

$$(3) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(8) 노드 s로부터 노드 d로 데이터가 송신될 경우 광 경로 V_{ij} 를 중간 링크로 사용하면 virtual topology route $v_{ij}^{sd}=1$ 이 되고 그렇지 않은 경우는 0이 된다. 위의 물리적 토폴로지와 가상 토폴로지에서 가장 짧은 경로로 데이터가 전달되는 경우 $v_{15}^{15} = v_{52}^{15} = 1$ 이고 나머지는 모두 0이다. 각 source와 destination의 연결 방법 56가지에 대하여 virtual topology route값들을 정할 수 있다.

(9) 광경로 V_{ij} 가 광파이버 링크 P_{mn} 를 사용하면 physical topology route $p_{mn}^{ij}=1$ 이 되고 그렇지 않은 경우는 모두 0이 된다. 가상 노드 1에서 시작하는 광 경로만을 위한 physical topology route를 예를 들면 다음의 경우만 1이 되고 나머지는 0이 된다.

$$\begin{aligned} p_{11}^{12} &= 1, & p_{13}^{13} &= 1, & p_{14}^{14} &= p_{11}^{14} = 1, \\ p_{13}^{15} &= p_{13}^{15} = p_{14}^{15} = 1, & p_{16}^{16} &= p_{16}^{16} = p_{14}^{16} = 1, \\ p_{13}^{17} &= p_{13}^{17} = p_{14}^{17} = p_{17}^{17} = 1, & p_{18}^{18} &= p_{18}^{18} = 1 \end{aligned}$$

(10) 지금까지 주어진 변수와 상수들을 활용하여 virtual link length와 virtual path length 값들이 구해진다. Virtual link length D_{ij} 는 다음 식으로부터 구해진다.

$$D_{ij} = \sum_{m,n} p_{mn}^{ij} d_{mn} \quad (4)$$

(11) Virtual path length L_{sd} 는 다음 식으로부터 구해진다.

$$L_{sd} = \sum_{i,j} v_{ij}^{sd} D_{ij} \quad (5)$$

이 문제에서 다음의 제약조건들이 만족되어야 한다.

(1) Virtual topology connection matrix V_{ij} 는 아래 두 식을 만족시켜야 한다.

$$\sum_j V_{ij} \leq T_i \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_i V_{ij} \leq R_j \quad \forall j \quad (7)$$

(2) Physical route variable p_{mn}^{ij} 는 다음 조건들을 만족해야 한다.

$$p_{mn}^{ij} \leq P_{mn} \quad (8)$$

$$p_{mn}^{ij} \leq V_{ij} \quad (9)$$

$$\sum_m p_{mk}^{ij} = \sum_n p_{kn}^{ij} \quad \text{if } k \neq i, j \quad (10)$$

$$\sum_n p_{in}^{ij} = V_{ij} \quad (11)$$

$$\sum_m p_{mj}^{ij} = V_{ij} \quad (12)$$

(3) Virtual route variable v_{ij}^{sd} 는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$v_{ij}^{sd} \leq V_{ij} \quad (13)$$

$$\sum_i v_{ik}^{sd} = \sum_j v_{kj}^{sd} \quad \text{if } k \neq s, d \quad (14)$$

$$\sum_i v_{si}^{sd} = 1 \quad (15)$$

$$\sum_j v_{jd}^{sd} = 1 \quad (16)$$

이와 같은 계산 결과로 평균 메시지 지연시간 (average message delay)을 계산하여 이 목적함수를 최소화하는 가상 토폴로지를 물리적 토폴로지에 mapping시키도록 한다. 즉

$$\text{Minimize } \sum_{s,d} L_{sd} \quad (17)$$

을 만족하는 가상 토폴로지를 찾는 것이다.

이를 위하여 초기 값으로 가상 토폴로지가 그림 3과 같다고 가정하고 아래 식으로 전체의 메시지 지연시간의 합을 구한다.

$$\sum_{s,d} L_{sd} \quad (18)$$

그후 노드 교환방식(node-exchange)으로 가상 노드의 위치를 변경해 가면서 여러 종류의 위치에 대하여 전체 지연시간을 구한 후에 전체 지연 시간을 최소화하는 가상 노드의 위치를 구하였다. 주어진 계산을 위하여 C++ 언어로 프로그래밍하여 PC환경에서 실행하였다.

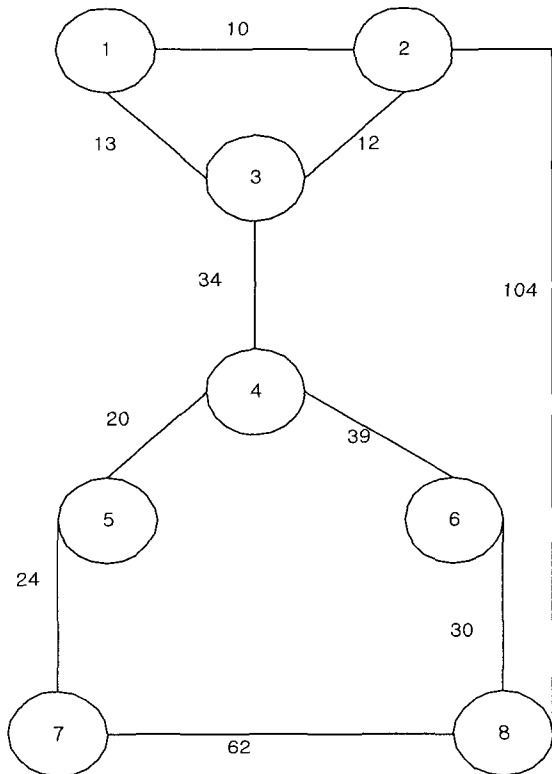


그림 3. 초기의 가상 토폴로지
Fig. 3. Initial virtual topology.

III. 계산 결과

그 계산 결과를 그림 4에 그렸다. 이 계산에서 전체 메시지 지연시간이 가장 짧은 가상 토폴로지가 여러 가지가 나왔으나 그중 한 가지를 그림 4에 그린 것이다. 이 가상 토폴로지에서는 가상 링크는 광경로를 나타내고 가상 링크의 끝에 위치한 노드에서 광신호가 전자신호로 바뀌어 처리된다. 이 결과를 토대로 물리적 토폴로지에 광경로를 그린 것이 그림 5이다. 예를 들면 그림 5에서 I-IV의 가상링크는 몇 개의 가능한 물리적 경로중에서 하나의 경로를 선택하여 한 개의 파장으로 설정된다. 즉 I-III-IV 또는 I-II-III-IV 또는 I-II-VIII-VI-IV의 물리적 경로중에서 하나를 선택할 수 있으나 이 최적화 시뮬레이션 결과로는 최단 거리인 I-III-IV 경로가 선택되었고 파장 2가 할당되었다. 이를 위하여 노드 III의 WRS에서는 I-IV의 광경로가 구성될 수 있도록 합당한 연결을 해주어야 한다. 즉 파장 2가 노드 I의 광파이버에서 노드 IV의 광파이버로 전광(全光)으로 연결되어야 한다. 이 그림에서는 광경로가 양방향으로 되어 있으므로 I-IV로 가는 광경로와

IV-I의 광경로가 동시에 존재함을 나타낸다.

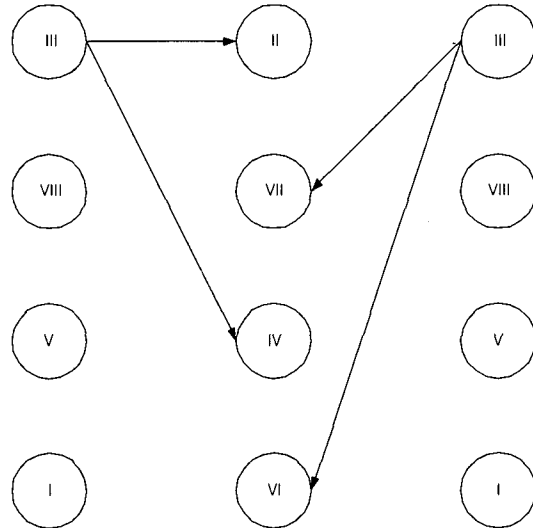


그림 4. 가상 토폴로지를 물리적 토폴로지에 mapping 한 결과
Fig. 4. Mapping result of the virtual topology to the physical topology.

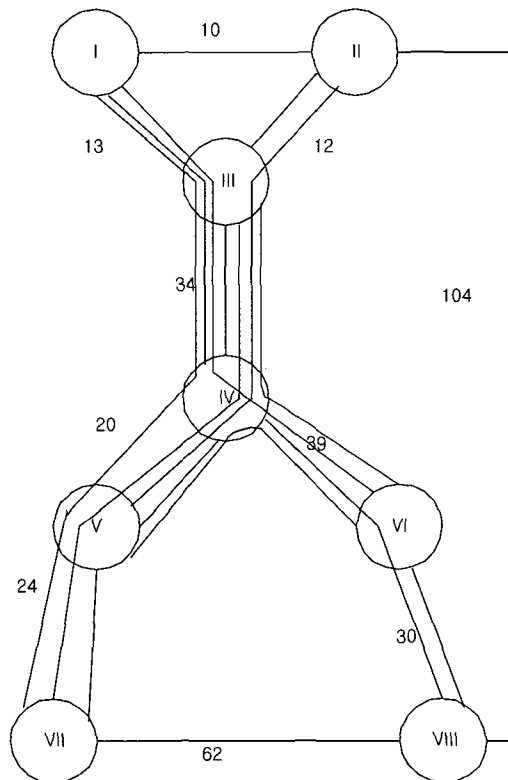


그림 5. 물리적 토폴로지에 그린 광경로
Fig. 5. Lightpath in the physical topology.

그림 5의 결과에서 광파이버에 최대 7개의 파장이 필요하다. 그러나 지연 시간 성능을 완화시키면 비용을 줄이는 방향으로 설계도 가능하다. 즉 광경로를 가장 짧은 물리적 거리를 취하지 않고 좀 더 먼 거리로 우회하도록 함으로써 필요한 파장의 수를 줄여 비용을 적게 할 수 있다.

그림 5를 토대로 V번 노드에서의 WRS의 구조를 그림 6에 나타내었다. 이 광스위치는 물리적 토폴로지에 의해 결정되는 두 개의 입력 광파이버와 두 개의 출력 광파이버에 연결되어 있다. IV번 노드에서 입력되는 광파이버에는 1,2,3,4,5의 다섯 종류의 파장이 사용되고 VII번 노드에서 입력되는 광파이버는 1,3,5의 세 가지 파장만이 사용된다. WRS는 라우터로부터 오는 네 개의 입력레이저와 연결되고 출력에는 네 개의 광필터를 통하여 라우터로 연결되어 네 개의 가상 링크를 형성하게 된다. 파장 3과 5는 V번 노드를 통과하는 clear channel이 되고 이웃하는 IV번과 VII번 물리 노드로 연결되게 된다.

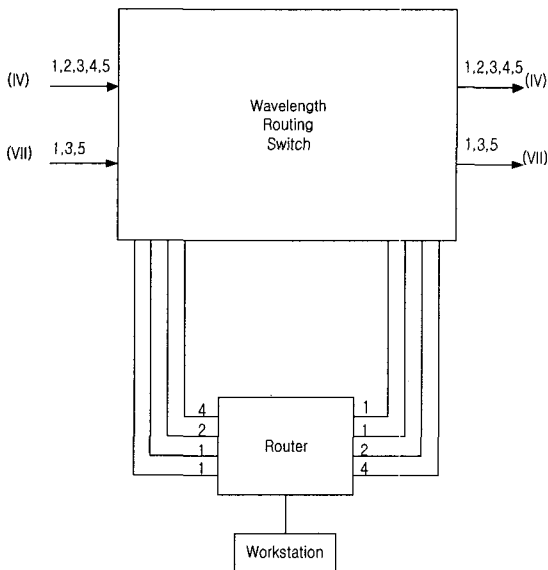


그림 6. V번 노드에서의 WRS 구조
Fig. 6. Wavelength-routing switch at node V.

V번 노드에서와 같은 WRS는 여러 가지 형태로 디자인할 수 있다. 입력 광파이버에서 들어오는 여러 파장의 신호들은 파장 역다중화기를 통하여 분리된 후에 광스위치를 통과하고 파장 다중화기를 거쳐 다시 통합되어 출력 광파이버에 입사된다. 여기서 파장 다중화기와 역다중화기 사이는 여러 가지 형태로 광스위치를

구성할 수가 있는데 첫째로 입력과 출력사이를 직접 광도파로로 연결하는 방법이다. 이 경우에는 트래픽의 변화에 따라서 연결 패턴을 변화시키기가 어려운 단점이 있다. 더 매력적인 방법은, 입력과 출력사이에 각 파장마다 $LiNbO_3$ 같은 재료로 만든 광스위치 어레이로 구성하는 방법이다. 이 광스위치 어레이는 전자적인 제어로 연결패턴을 변경시킬 수 있으므로 트래픽의 변화에 따라서 네트워크의 가상 토폴로지를 재구성할 수 있다. 그림 6에서 라우터는 전자적 패킷스위치를 의미한다.

그림 5와 같이 광경로가 결정되면 각 광경로에 대하여 고유한 파장을 할당하여야 한다. 이 파장할당을 위한 알고리즘은 다음과 같다.

(1) 각 물리적 링크에 대하여 그 물리적 링크를 지나는 가상 경로의 수가 많은 것으로부터 적은 순서로 번호를 매긴다. 이 문제에서는 III과 IV를 연결하는 물리적 링크에 7개의 가상 링크가 지나므로 첫 번째 순서가 된다.

(2) 이 순서대로 각 링크에 대하여 고유한 파장을 할당하여 가는데 이미 할당된 파장은 변경하지 않도록 한다.

이를 정리하면 물리적 링크마다 광링크에 대하여 서로 다른 파장을 할당하고 각 광경로에는 동일한 파장이 할당되도록 한다. 이는 광경로에서 파장의 변환이 없음을 의미한다.

V. 결 론

본 논문에서는 주어진 물리적 토폴로지를 하나 걸른 행과 연결된 이중층 서플넷에 mapping하는 방법을 제안하였다. 모든 소스노드에서 목적지노드로 전달되는 트래픽은 균일하다고 가정하였고 imbedding 방법은 물리적 토폴로지에서 최단거리 라우팅을 하는 경우로 가정하였다. 서플넷에서 각 노드의 가상 링크는 p 개로 고정되어 있으나 하나 걸른 행과 연결된 이중층 서플넷을 가상 토폴로지로 사용하면 $2p$ 개로 가상 링크수가 증가하여 더욱 효과적인 광역 광네트워크를 설계할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 지윤규, 심현정, "WDM 멀티홉 광통신망을 위한

- 하나 걸른 행과 연결된 이중층 서플넷 토폴로지,”
한국통신학회논문지 제22권 5호, pp. 1064~1074,
May 1997.
- [2] Biswanath Mukherjee, *Optical Communication Networks*, McGraw-Hill, 1997.
- [3] B. Mukherjee et al, “Some Principles for
Designing a Wide-Area Optical network”,
IEEE INFORCOM'94, Toronto, Canada, pp.
110~119, June 1994.
- [4] Thomas E. Stern and Krishna Bala,
Multiwavelength Optical Networks, pp. 379~
439, 1999.

저 자 소 개

池 尹 圭(正會員) 第38卷 SD編 第6號 參照