

WDM 방식을 사용하는 다중홉 구조의 광 통신망을 위한 가상 토폴로지

정희원 이남재*, 박훈성**

A Virtual Topology for Multihop Lightwave Networks Using WDM

Nam-jae Lee*, Hoon-sung Kwak** *Regular Members*

요 약

일반적으로 WDM(Wavelength Division Multiplexing)기반 다중 홉 구조의 광 네트워크의 성능은 평균 홉 수에 의해 좌우된다. ShuffleNet 구조는 간단한 라우팅 기법과 적은 평균 홉 수 때문에 다중 홉 구조의 광 네트워크의 좋은 토폴로지 구조로 자주 적용된다.

본 논문에서는 다중 홉 구조의 광 네트워크를 위한 거울망(MirrorNet)이라는 가상 토폴로지를 제안하였다. 제안된 거울망은 현재 광 스위칭 소자 기술 환경을 감안하여 링크의 수를 두 개로 고정하였다. 거울망은 광 소자들을 실제 증가시키지 않고도 평균 홉 수를 줄임으로서 시스템의 성능을 향상시켰다.

ABSTRACT

Generally, the performance of WDM-based multihop lightwave network depends on the average hop distance in the network. Because of the simple routing scheme and the small average hop distance, the ShuffleNet is adopted for multihop lightwave networks as a novel topology.

In this paper, we propose a virtual topology for a multihop lightwave network called MirrorNet. The number of links of our proposed network is two for practical environments. Without increasing the optical devices, the MirrorNet improves the system performance by reducing the average hop distance.

I. 서 론

WDM은 고속 망을 구현하기 위하여 사용된 광 섬유에 방대한 대역폭을 효율적으로 이용하기 위한 방법이다. 최근에 이르러 레이저와 광 필터의 발전은 이러한 WDM 기법에 대한 연구의 방향을 보다 다양한 분야로 활성화시키는데 주요 동기를 제공하였다.^[1] 빛의 파장 분할을 이용하여 동시 전송이 가능한 다중 채널을 제공하는 이 기법에 대한 연구는 단일 홉과 다중 홉 구조로 크게 분류할 수 있다. 이중 단일 홉은 일반적으로 수동 스타 형태의 가상

토폴로지를 가지며 ALOHA를 기반으로 한 전송 프로토콜을 사용한다. 그러나 이러한 구조는 각 노드에서 가질 수 있는 송/수신기의 개수와 송/수신기의 빠른 튜닝 시간 요구, 사전 전송 관계 설정 및 전자적인 처리 속도와 광 전송 대역폭의 불일치로 인한 문제점이 발생한다.^[2] 이러한 하드웨어적인 제약들을 극복하기 위한 방안으로 시스템의 높은 효율과 송수신측 사이의 적은 지연시간을 제공하는 다중 홉에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.^[1,2]

다중 홉의 구조는 망 내 노드간의 연결이 정규적인 형태와 비정규적인 형태가 있다. 비정규적인 형태는 망의 구성을 최적화 할 수 있으나 라우팅에

* 전북대학교 컴퓨터공학과 (njlee@nms.chonbuk.ac.kr),
논문번호 : 99303-0729, 접수일자 : 1999년 7월 29일

** 전북대학교 컴퓨터공학과 (hskwak@moak.chonbuk.ac.kr)

다른 부담 때문에 상대적으로 정규적인 연결 패턴을 갖는 구조가 많이 채택된다. 이러한 정규적인 구조에서의 주요 연구 대상은 링크의 이용률을 향상시키는 것이며, 이를 위해서 각 노드간의 평균 홉 수를 줄일 수 있는 망 토폴로지의 개발과 링크 이용률의 불균형을 해소하기 위한 노드 재배치 및 적응적 라우팅 기법을 개발해야 한다.

II. 기존 연구에 대한 개관

기존에 연구된 정규적인 형태의 가상 토폴로지들은 ShuffleNet, De Bruijn Graph, Manhattan Street Network(MSN) 및 HyperCube 등이 있다. 이중 De Bruijn Graph는 가장 적은 평균 홉 수를 가지나 두 개의 필요 없는 순환링크를 가지며, 각 링크에 적용되는 부하의 불균형 때문에 망의 최대 처리율(Throughput)이 낮고, MSN은 많은 최소 경로를 지나 평균 홉 수가 상대적으로 많아지며, HyperCube는 노드 수에 따라 망의 링크 수(Degree)가 증가한다는 단점 때문에 ShuffleNet이 가장 각광 받고 있다.

ShuffleNet은 적은 평균 홉 수와 간단한 라우팅 기법에 장점이 있는 반면에 다음 두가지의 단점을 가진다. 첫째로 노드 수의 지수 함수적인 증가이다. 즉, 링크의 수가 많아지면 네트워크내의 노드수가 링크의 지수 승에 따라 증가하게 된다. 두 번째는 두 개의 노드간에 상호 전송되는 데이터의 평균 홉 수가 달라지는 노드간의 전송 불균형 등을 들 수 있다. ShuffleNet을 기반으로 한 가상 토폴로지들에 대한 연구는 Bilayered ShuffleNet^[3], Loop-Augmented ShuffleNet^[4], Multiple-Ring ShuffleNet^[5], Extra/Reduced Stage ShuffleNet^[6] 등이 있다. 이 가운데 ^[3]은 반대 방향의 추가 링크를 사용하여 평균 홉 수를 줄였고, [4][5]는 하나의 새로운 링크를 각 칼럼끼리 연결하여 평균 홉 수를 줄여서 망의 이용률을 향상시켰으며, [6]은 망내 노드 수를 증가시키기 위하여 중간에 여분의 새로운 칼럼을 삽입하는 방법을 사용하여 노드 수의 지수함수적 증가에 대한 단점을 극복하였다. 그러나 [6]은 망내 노드 수에 따라 구성 자체가 변하기 때문에 일률적인 망 구성이 어렵고 구성 때마다 새로운 라우팅 기법을 필요로 하는 문제점이 발생한다. 또한 [3][4][5]는 비록 평균 홉 수는 줄였지만 실제적으로는 링크수가 한 개^{[4][5]}, 또는 두 개^[3] 증가한 형태이다. 따라서 각 노드의 링크 수가 두 개인 Shuffle-

Net과 비교하거나^{[3][4]}, 링크 수 두 개에 단순히 하나의 링크를 추가시키는 형태로의 비교에서는 더 좋은 성능을 보였지만 실제 링크수가 3 이나 4로 연결된 일반 ShuffleNet과 비교한 성능은 표 1에서 보는 바와 같이 오히려 떨어진다. 더구나 링크수의 증가는 곧 각 노드가 가져야 되는 광 송수신기의 증가를 가져오므로 경제적인 면에서도 효율적이지 못하다.

표 1. 다양한 다중홉 망에서의 평균홉 수 비교

	N	E{Hop}
ShuffleNet_Deg3	1215	6.5074
	4374	8.0025
ShuffleRing_Net	896	6.6942
	2048	8.2697
Loop_Aug_Net	896	7.4045
	2048	8.8368
ShuffleNet_Deg4	192	3.6911
	1024	5.1730
Bilayered	384	5.5718
	896	6.0938

III. 거울망

본 논문에서 제안된 거울망은 일반 ShuffleNet과 비슷한 연결 구조를 가지고 있다. 즉 (p, k) ShuffleNet의 경우처럼 각 칼럼 안의 노드 수는 p^k 개이고, 전체 노드의 수도 kp^k 로 같다. 그러나 거울망에서는 링크의 수를 두개로 제한하여 (2,k) ShuffleNet의 형태를 가진다. 또한 ShuffleNet이 한 칼럼 안의 노드들이 한 홉에 도달할 수 있는 노드의 수가 다음 칼럼 내의 노드들로 한정된 것과는 달리 거울망에서는 양방향의 칼럼에 도달할 수 있기 때문에 전체 망의 평균 홉 수를 줄여 성능을 향상시킬 수 있다. 노드 수가 24개인 (2,3) 거울망에 대한 각 노드간 링크의 연결 구조를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 거울망은 모든 칼럼을 이등분하여 두 개의 그룹으로 나눈다. 이중 상위 그룹은 일반 ShuffleNet과 같은 형태의 연결성을 가지고 하위 그룹은 반대 칼럼방향으로의 연결성을 갖는다. 따라서 한 칼럼 내의 노드들이 한 홉에 도달할 수 있는 노드의 수가 일반 ShuffleNet보다 최대 2배가된다. 이 때문에 전체 망의 평균 홉 수가 줄어들어 채널의 효율이 높아지므로 링크의 수를

늘이지 않고도 망의 성능을 향상시킬 수 있다.

또한 거울망에서는 한 칼럼 내의 노드 중 각 그룹별로 하나씩의 양방향 링크를 가지는 특수한 노드가 존재하게 된다. 이러한 양방향 링크들을 이용하여 기존 ShuffleNet이 가지는 노드간의 전송 불균형도 어느 정도 극복할 수 있다. 즉, 상호 트래픽양이 상대적으로 많은 노드끼리는 양방향 링크로 연결하여 사용할 수 있다. 그러나 거울망은 De Bruijn Graph와 마찬가지로 정규적이긴 하지만 ShuffleNet과 같이 모든 노드에 대해 대칭적(Symmetric)이지는 않다. 그러므로 노드 위치에 따라 전체 망의 평균 홉 수가 달라질 수 있으며 이때 양방향의 링크를 가지는 노드는 두 번째 홉 수에서 자기 자신에게 다시 올 수 있어 결국 가장 큰 평균 홉 수를 가지게 된다. 또한 각 노드의 평균 홉 수를 계산해 보면 상위 그룹 내의 노드들과 하위 그룹 내의 노드들이 거울이 비친 형태를 가지고 있다. 즉, 그림 1에서 보느바와 같이 한 칼럼 안의 노드 수가 8개이고 각각 0에서 7까지 번호가 부여되었다면 0과7, 1과6, 2와5, 3과4의 평균 홉 수가 서로 같게 된다.

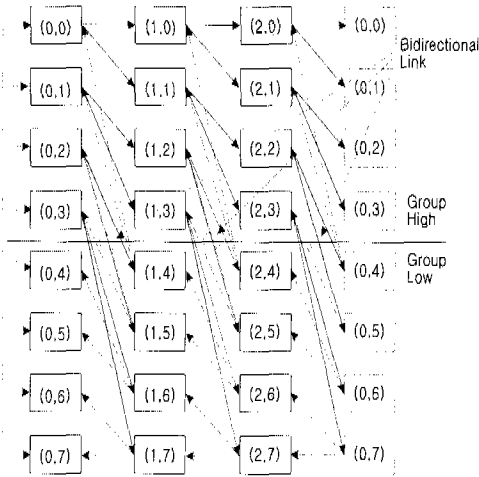


그림 1. 거울망의 연결구조

IV. 거울망의 일반 형태

1. 거울망의 연결 구조

거울 망내 각 노드간의 연결은 현재 노드를 (C, R)로 나타내고 연결될 노드를 (C+, R+)로 나타내었을 때 다음과 같은 알고리즘에 의해 연결이 이루어진다.

```

main() {
    int R ; /* 현재 Row, 0 ≤ R < 2k-1 */
    int C ; /* 현재 칼럼, 0 ≤ C ≤ k-1 */
    int R+; /* 연결될 다음 Row, 0 ≤ R+ ≤ 2k-1 */
    int C+; /* 연결될 다음 칼럼, 0 ≤ C+ ≤ k-1 */

    if (상위 그룹 노드) {
        C+ = (k+C+1) mod k;
        for(i=0 ; i < 2 ; i++)
            R+ = (2*R + i);
    }
    else {
        C+ = (k+C-1) mod k
        for(i=0 ; i < 2 ; i++)
            R+ = (2*R + 1) mod 2k
    }
}
    
```

2. 거울망의 평균 홉 수

거울망은 De Bruijn 그래프와 같이 비대칭(Asymmetric)적인 구조를 가지므로 노드 위치에 따라 평균 홉 수에 대한 계산이 틀려진다. 따라서 모든 노드에 대한 평균 홉 수를 정확히 고정된 수식으로 구할 수 없다. 때문에 본 논문에서는 망의 평균 홉 수에 대한 상한 값(Upper Bound)을 갖는 노드에 대해서만 수식으로 구하고 전체 노드의 평균 홉 수에 대해서는 모든 노드가 임의의 다른 노드로 갈 수 있는 최단거리 알고리즘을 사용한 프로그램을 통하여 구하였다. n(h)를 h홉 후 도달할 수 있는 노드의 수라 하면 망의 평균 홉 수에 대한 상한 값은 칼럼의 짝, 홀수에 따라 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \text{even}, \quad \text{Diameter} = k + \frac{k}{2},$$

$$P = 2$$

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

$$k = \text{odd}, \quad \text{Diameter} = k + \frac{k-1}{2},$$

$$P = 2$$

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

위 식 (1)과 (2)를 이용하여 식(3)과 같이 망 내 평균 홉 수를 구할 수 있다.

$$\text{평균홉수} = \sum_{k=1}^n h * n(k) \quad (3)$$

제안된 거울망에서 상한 값을 갖는 노드들은 양방향 링크를 가지고 있는 노드들이며 이들 노드의 번호는 식(4)와 같이 0과 1이 칼럼 수에 따라 일정하게 반복되는 이진수 형태로 찾을 수 있다. 시뮬레이션을 통하여 얻어진 거울망의 평균 홉 수를 ShuffleNet과 비교하여 그림 2에 나타내었다. 그래프에 나타난 바와 같이 거울망의 평균 홉 수는 상한 값을 가지는 노드라 할지라도 기존 ShuffleNet보다 평균 홉 수가 적은 것을 알 수 있다.

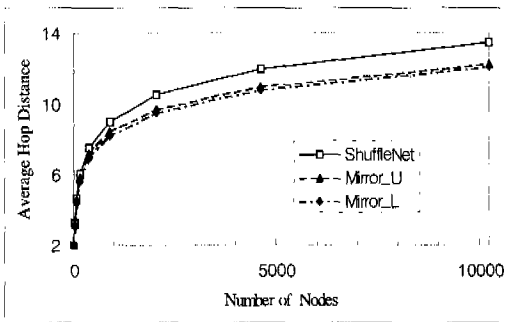


그림 2. 거울망의 평균홉 수

$$\text{Upper Bound Node} = \begin{cases} k=2 & 1 \\ k=3 & 10 \\ k=4 & 101 \\ k=5 & 1010 \end{cases} \quad (4)$$

V. 성능 평가

제안한 거울망을 최단거리 알고리즘을 사용한 프로그램에 통하여 평균 홉 수에 대한 상한 값, 하한 값 및 전체 평균값을 구한 후, 채널의 효율과 사용 가능한 채널 용량을 산출하였다. 이를 기반으로 전체 네트워크의 처리율과 사용자에 대한 처리율 및 평균 큐잉 지연시간을 구하여 기존 ShuffleNet과의 성능을 비교하였다.

1. 채널의 효율 및 처리율

채널의 효율 η 은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다

며^[3], 그림 3에 기존의 ShuffleNet과 비교하여 도시하였다. 또한 채널의 수를 W , 전체 노드의 개수를 N 이라 하면, 거울망의 경우, ShuffleNet과 같이 W 는 $k^{2^{k+1}}$ 로 나타낼 수 있고 이때 전체 네트워크의 처리율과 사용자의 처리율은 각각 식 (6)과 (7)로 나타낼 수 있다. 전체 네트워크를 이루는 칼럼 수 K 에 따른 거울망의 전체 처리율 및 사용자의 처리율을 각각 그림 4, 5에 나타내었다. 그래프에 나타난 바와 같이 제안한 거울망이 링크의 수가 같음에도 불구하고 모든 면에서 기존의 ShuffleNet 보다 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.

$$\text{Channel Efficiency } \eta = \frac{1}{E\{\text{hops}\}} \quad (5)$$

$$\text{Total Network Throughput} = \eta \cdot W \quad (6)$$

$$\text{User Throughput} = (\eta \cdot W) / N \quad (7)$$

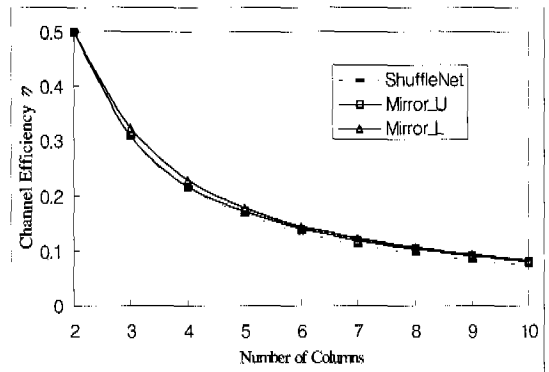


그림 3. 칼럼수 K에 따른 채널의 효율

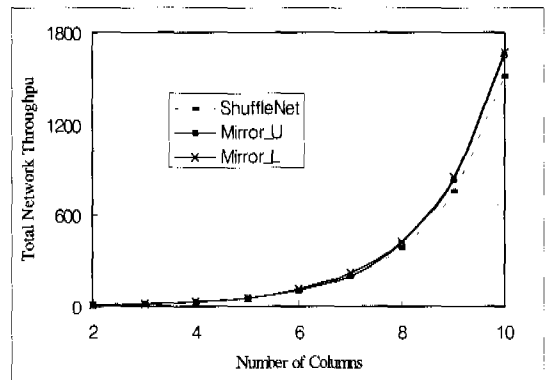


그림 4. 칼럼수 K에 대한 거울망의 전체처리율

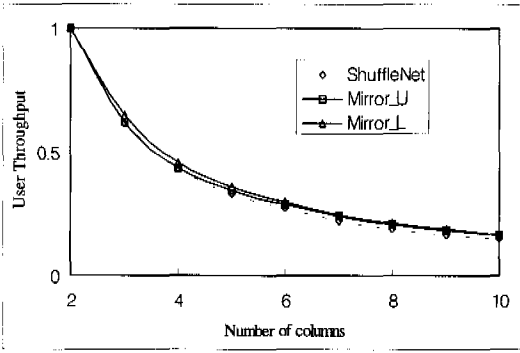


그림 5. 칼럼 수 K에 대한 거울망의 사용자 처리율

2. 사용 가능한 채널의 용량

전체 네트워크에서 사용 가능한 채널의 용량은 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며^[8], 채널의 속도 S를 1Gbps로 하였을 때, 거울망의 사용 가능한 채널 용량을 그림 6에 나타내었다. 또한 전체 네트워크에서 각 노드가 발생하는 트래픽의 양을 λ , 어느 특정 노드로 향하는 망 내 트래픽 양을 α 라 하면 노드의 한 출력 버퍼에 도착하는 트래픽의 양은 식(9)와 같이 λ^* 로 표시할 수 있다^[8]. 이때 망에서 전송 패킷이 전송을 완료하고 제거되는 시간을 τ 라 하면 각 노드에서의 단위 시간당 네트워크 내 패킷 생성 빈도(Traffic Intensity) Λ 는 식(10)과 같이 1 이하 이어야 시스템의 안정이 이루어진다^[8]. 제안된 거울망은 연결 방법만 ShuffleNet과 차이가 있을 뿐 노드에서 발생하는 트래픽의 양과 처리되는 트래픽의 양은 ShuffleNet과 동일하다. 따라서 제안된 거울망의 출력포트를 모델링하기 위하여 M/M/1 큐잉 모델을 사용하였으며, 이때 네트워크 내 트래픽의 평균 지연시간 D_1 은 식(11), 전체 큐잉 지연시간 D 는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다^[8].

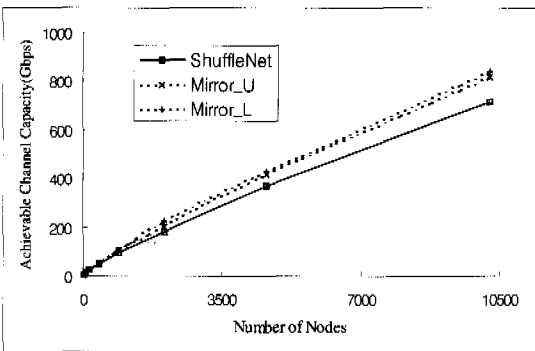


그림 6. 거울망의 사용 가능한 채널의 용량

$$\text{Achievable Capacity } C = \frac{WS}{E\{Hops\}} \quad (8)$$

$$\lambda^* = \frac{2}{\lambda} + \frac{2\alpha - \lambda}{2} = \alpha \quad (9)$$

$$\Lambda = \alpha * \tau < 1 \quad (10)$$

$$D_1 = \Lambda / (1 - \Lambda) \quad (11)$$

$$D = D_1 E\{Hops\} = \frac{\Lambda}{1 - \Lambda} E\{Hops\} \quad (12)$$

식 (12)를 이용하여 제안된 거울망의 전체 큐잉 지연시간을 구한 뒤, 기존 ShuffleNet과 비교하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 도시된 바와 같이 지연 시간 면에서도 제안된 거울망이 기존의 ShuffleNet 보다 좋은 성능을 나타내었다.

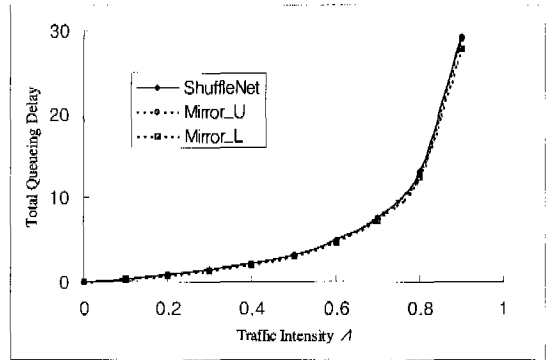


그림 7. 제안된 망의 전체 큐잉 지연시간

VI. 결론

본 논문에서는 실용적인 환경을 고려하면서도 망의 성능을 향상시킬 수 있는 ShuffleNet 기반의 가상 토폴로지인 거울망을 제안하였다. 제안된 거울망은 현재 스위칭 소자 기술을 감안하여 망 내 각 노드간의 링크 수를 두 개로 고정시켰으며, 각 노드간의 연결 형태를 일반 ShuffleNet과 달리 새로운 방법으로 구성하여 링크 수를 증가시키지 않고서도 평균 홉 수를 줄임으로써 링크의 이용률을 향상시켰다. 즉, 기존의 ShuffleNet은 한 칼럼 내의 각 노드들이 도달할 수 있는 노드의 수가 앞쪽 한 칼럼 내의 노드 수인 반면, 제안된 망은 링크의 수를 문헌 [3,4,5]에서와 같이 증가시키지 않고도 양쪽 방향으로 기존 ShuffleNet보다 최대 2배의 노드들에 도달할 수 있다. 따라서 전체 망에 대한 각 노드의

