

논문 2007-44TC-2-1

# WDM 네트워크에서 동적 워터마크 결정을 이용한 로드밸런싱

## ( Loadbalancing for WDM Network using Dynamic Watermarks )

남 정 주\*, 김 성 천\*

( Jungjoo Nahm and Sungchun Kim )

### 요 약

과장분할다중화방식(WDM - Wavelength Division Multiplexing) 네트워크는 차세대 전송망으로서 주목받고 있다. WDM 네트워크는 IP, SONET, ATM 과 같은 클라이언트층에 광경로를 통한 circuit-switching을 제공함으로써 전송속도의 향상, 트래픽 패턴에 따른 토폴로지 재구성등을 가능하게 한다. 광경로들의 집합으로서 가상 토폴로지가 정의되는데, 각각의 광경로를 정의하는 광학 스위치들이 재구성 가능하기 때문에, 가상 토폴로지도 재구성 가능하게 된다. 이러한 WDM 네트워크의 특징은 클라이언트 층이 요구하는 트래픽 패턴에 따라 가상 토폴로지를 재구성함으로써 네트워크 성능을 최적화 시킬 수 있게 한다. 본 논문에서는 시간에 따라 변화하는 트래픽 패턴 하에서 가상 토폴로지를 재구성하면서, 각 광경로의 트래픽에 대한 로드밸런싱을 하는 기법을 제시한다. 이 기법은 기존의 기법들과는 달리 미래의 트래픽 패턴을 알고 있다는 가정을 필요로 하지 않는다. 제안된 기법의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션을 위하여 실제 백본 네트워크에서의 트래픽을 측정하여 이를 통한 트래픽 모델링을 하였다. 제안된 기법과 이전 기법과의 광경로에 대한 표준편차의 비교를 통해, 제안된 기법이 이전 기법보다 로드밸런싱에 있어 성능향상을 보여준다는 것을 알 수 있었다.

### Abstract

Wavelength-division multiplexed (WDM) networks are emerging to be the right choice for the future transport networks. In WDM networks, the optical layer provides circuit-switched lightpath services to the client layer such as IP, SONET and ATM. The set of lightpaths in the optical layer defines the virtual topology. Since the optical switches are reconfigurable, the virtual topology can be reconfigured in accordance with the changing traffic demand pattern at the client layer in order to optimize the network performance. We present a new approach to the virtual topology reconfiguration and loadbalancing problem for wavelength-routed, optical wide-area networks under dynamic traffic demand. By utilizing the measured Internet backbone traffic characteristics, our approach follows the changes in traffic without assuming that the future traffic pattern is known. For the simulation traffic modeling, we collected the data from real backbone traffic. Experiments show that the standard deviation compared to previous technique is reduced.

**Keywords:** WDM, virtual topology, reconfiguration, loadbalancing

### I. 서 론

과장분할다중화방식(WDM - Wavelength Division Multiplexing)과 과장 라우팅은 차세대 백본 전송망에 대한 기술로서 주목받고 있다. 하나의 광경로는 물리적인 링크들의 순열로 표현될 수 있으며 그것을 이루는 물리적 링크들에서 같은 과장을 사용해야 한다. 이러한 제약은 과장 연속성 제약(Wavelength continuity constraint)으로 알려져 있다. 이러한 제약 사항을 준수

하기 위해서는 물리적 링크가 수용할 수 있는 과장의 개수가 많아야 하고, 각 노드에서는 사용되는 과장 별로 설정된 입력 포트와 출력 포트의 개수가 많아야 한다. 그래서 확장성과 경제적인 이유로, 노드에서 전기적 신호로의 변환 없이 각 과장을 스위칭 해주는 과장 변환이 연구되었다<sup>[1]</sup>. 본 논문에서는 전과장변환기능(Full wavelength-conversion capability)을 장비한 광라우터를 가정한다. 그러므로 본 논문에서는 하나의 광경로가 여러 개의 과장을 사용하여 이루어질 수 있음을 가정한다.

WDM 네트워크 가상 토폴로지의 재구성에 대한 연구는 차세대 광통신 기술의 핵심 부분으로 많은 연구가

\*정회원, 서강대학교 컴퓨터학과

(Dept. of Computer Science Sogang Univ.)

접수일자: 2006년4월10일, 수정완료일: 2007년2월14일

수행되었다. 하지만, 기존의 연구들은 WDM 네트워크의 물리적 토폴로지와 현재의 가상 토폴로지 그리고 미래의 트래픽 패턴이 주어질 때, 미래의 트래픽 패턴에 가장 적합한 가상 토폴로지를 찾아내고 현재의 가상 토폴로지에서 가장 적합한 미래의 가상 토폴로지로의 변형과정에 대한 연구가 대부분이었다. 하지만, 실제 트래픽에 대한 고찰을 통하여, 미래의 트래픽 패턴을 주어진다는 기본 연구들에서의 가정이 현실적이지 않다는 문제점이 제시되었다. 그에 대한 해결책으로서 광경로의 로드와 대한 고정된 워터마크를 이용하여 실시간 가상 토폴로지 재구성 기법이 제안되었다<sup>[2]</sup>. 하지만, [2]에서 제시된 기법은 고정된 워터마크를 가상 토폴로지 재구성에 이용하기 때문에, 트래픽의 변화를 능동적으로 반영하지 못한다. 따라서 본 논문에서 [2]에서 제시된 기법을 개선하여, 주기적으로 수행되는 가상 토폴로지의 재구성과정에서 다음 수행에서의 워터마크를 동적으로 결정하는 기법을 제안한다.

## II. 기존 가상 토폴로지 재구성 기법

WDM 네트워크는 광경로들을 재구성할 수 있고, 이로 인해 주어지는 트래픽의 변화하는 패턴에 대해 동적으로 네트워크를 최적화 할 수 있게 된다. 즉, 광경로들의 집합으로 표현되는 가상 토폴로지를, 기대되는 트래픽의 변화 패턴에 따라 디자인함으로써 네트워크를 최적화하게 된다. 이와 같은 가상 토폴로지의 재구성 디자인에 대한 연구는 LAN 환경에서 가정하여 방송(broadcast) 환경에서의 연구와 WAN 환경에서의 파장라우팅(wavelength-routed) 환경에서의 연구로 분류될 수 있으며, 본 논문에서는 파장 라우팅 환경을 가정한다.

이러한 가상 토폴로지 재구성에 대한 연구는 미래의 트래픽 패턴에 가장 적합한 가상 토폴로지를 찾고, 현재의 가상 토폴로지에서 찾아낸 미래의 가상 토폴로지로의 변환 과정에 대한 연구가 주류를 이루었다. 이와 같은 선행 연구로서 미국의 백본 망인 NSFNET의 개선을 목표로 하여 현재의 가상 토폴로지에서 주어진 미래의 트래픽 패턴에 가장 적합한 가상 토폴로지를 찾아내는 기법이 연구되었다<sup>[3]</sup>. 이 기법은 우선, 가상 토폴로지 디자인에 대한 문제를 공식화하였다. 그리고 네트워크 전체의 평균 패킷 지연 시간의 최소화과 트래픽 행렬에 대한 스케일링 요소의 최대화를 목표 함수로 정의하였다. 이 기법은 패킷 트래픽의 라우팅을 위해

flow deviation 기법을 적용하였으며, 전체적인 알고리즘은 simulated annealing 형식을 이용하였다.

또 다른 연구로서, 가용한 파장의 개수, 토폴로지의 연결성, 가상 토폴로지에서 트래픽 라우팅등의 제약사항등을 공식화하여 평균 패킷 홉 거리등의 목적 함수의 값을 최소화하는 linear formulation을 이용한 방법들이 제시되었다<sup>[4]</sup>. 하지만, 이러한 연구 역시, 미래의 트래픽 패턴을 알고 있다는 가정 하에서의 연구라는 한계가 있고, 네트워크의 크기와 고려되어야 하는 제약사항들이 많아질수록 목표로 하는 가상 토폴로지를 찾는 것은 불가능에 가까워지는 문제점이 있다.

위에 열거한 기존 기법들의 문제점, 즉 미래의 트래픽 패턴의 인지에 대한 가정과 다단계 재구성의 문제점을 해결하고자 하는 기법이 최근 연구되었다. 시간에 따라 변동하는 트래픽을 실시간으로 주기적으로 감시하면서 트래픽량을 측정하고, 측정된 각 광경로의 로드값이 정해진 워터마크 값을 넘을 때 그 광경로 하나만을 재구성하는 연속적인 측정-조정 방법의 연구되었다<sup>[2]</sup>. 이러한 방법을 통해 기존 연구에서 미래의 트래픽 패턴을 알고 있다는 가정을 통해 발생하는 문제를 해결하였다. [2]에서 제안된 기법은 기존의 연구들에서의 문제점을 많은 부분 해결하였지만, 중요한 시스템 인수인 워터마크 값이 초기에 설정된 그대로 측정-조정 수행하기 때문에 트래픽 패턴의 변동에 능동적으로 대처하지 못하는 문제점이 있었다. 즉, 고정된 워터마크를 사용함으로써 전체 트래픽 량의 변화에 따라 단기간에 가상 토폴로지의 재구성을 빈번히 수행해야 하는 문제점이 있었다. 따라서 본 논문에서는 광경로의 추가 또는 삭제를 결정함으로써 가상 토폴로지의 재구성을 결정하는 워터마크 값을 알고리즘 수행 시점에서의 최대 또는 최소 광경로 로드와의 함수관계를 이루게 함으로써 트래픽 패턴의 변동에 능동적으로 대처하며 또한 점진적인 로드 밸런싱을 하는 기법을 제안한다.

## III. 동적 워터마크를 이용한 가상 토폴로지 재구성 방법

### 1. 네트워크 모델

물리적 토폴로지는 12개의 노드로 이루어져있으며 18개의 양방향 링크로 상호 연결되어있다[그림 1]. 하나의 링크에서 동시에 사용되는 파장의 개수는 16개로 가정하였으며, 각 노드는 8개의 송신포트와 8개의 수신포트를 가지고 있다고 가정하였다. 또한 각 노드는

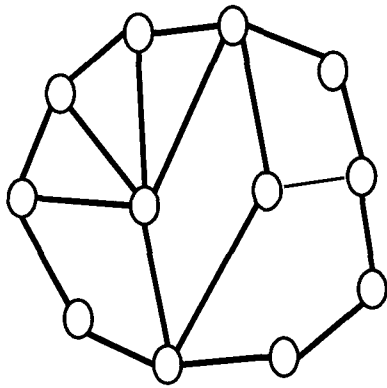


그림 1. 물리적 토폴로지  
Fig. 1. Physical Topology.

전 파장 변환 기능을 가지고 있다고 가정한다. 본 논문에서는 제안한 알고리즘을 위한 모든 정보에 대해 중앙 집중식을 선택했다. 즉, 임의의 한 노드가 제안한 알고리즘의 관리 노드가 되어서, 알고리즘 수행마다 각 노드로부터 가상 링크, 즉 광경로의 로드 정보를 받아서 알고리즘을 수행하게 된다. 또한 정보 수집을 위한 시간이 알고리즘의 수행 주기에 비해 무시할 수 있을 정도의 작은 시간임을 가정한다. 본 논문에서는 각 노드의 라우터로 들어오는 모든 패킷 트래픽을 처리할 수 있으며, 라우터로부터 나가는 모든 트래픽의 양에 대한 정보를 수집할 수 있다고 가정한다.

광계층에서는 물리적 토폴로지 상에서의 광경로의 라우팅을 위해 최단경로 라우팅을 이용한다. 또한 파장의 할당에 대해서는 first-fit 방식을 적용했다<sup>[5]</sup>. 이 방식은 사용하는 모든 파장에 일련번호를 주고, 가용한 파장을 검색할 시점에서 낮은 번호의 파장을 선택하는 방식이다. 이 방식의 장점은 파장 할당을 위해 전역적인 정보가 필요하지 않다는데 있다. 또한 비교적 적은 오버헤드와 낮은 계산 복잡도로 인해 실제적으로 많이 사용되고 있는 방식이다. 패킷에 대한 라우팅방식은 기존의 라우팅 프로토콜에 의해 빈번히 사용되는 최단경로 라우팅방식을 적용한다.

2. 트래픽 모델

본 논문의 핵심은 실제 백본 WDM 네트워크에서의 광경로에 대한 로드벨런싱 기법이다. 그러므로 트래픽을 모델링하는데 있어서 실제 백본 링크에서의 트래픽을 관찰하여 모델링하였다. 현실성있는 모델링을 위하여, 본 논문에서는 몇몇 백본 링크에서 하루를 주기로 값을 수집하였다. 수집된 값을 가지고 시간에 대한 트래픽의 함수를 만들 수 있었고, 이 함수들을 이용하여

시뮬레이션에서의 트래픽을 생성하게 되었다. 각 노드 쌍에 대해서 시뮬레이션 트래픽 패턴을 생성하기 위해, 위의 함수들을 랜덤하게 선택하였고, 일정 범위 내에서 스케일링을 하였다. 결과적으로 만들어지는 트래픽 행렬의 각 원소는 시간에 대해 연속적인 트래픽 변화를 나타내게 된다. 이와 같은 트래픽의 모델링을 통하여 이전의 기법들이 가정하였던 미래의 트래픽에 대한 정보를 필요로 하지 않게 되었다.

3. 제안 기법

본 논문에서 제안하는 기법은 네트워크 트래픽의 흐름을 연속적으로 관찰하면서 가상 토폴로지의 변형이 필요할 때에만 간단히 재구성하는 실시간 재구성 기법으로, 가상 토폴로지의 변형 여부를 결정하는 워터마크를 동적으로 변화시키는 기법이다. 기본적인 생각은 네트워크 혼잡이 일어나서 하나의 광경로에 과부하가 걸리고, 그것이 상한 워터마크를 넘어서는 때 새로운 광경로를 설치하여 해결하고, 반대로 비효율적인 저부하 광경로를 제거하는 것이다. 또한 상한과 하한을 나타내는 워터마크의 값을 트래픽에 대한 관찰을 통하여 동적으로 결정함으로써 광경로에 대한 전체적인 로드벨런싱을 이루는 것이다.

이전의 알고리즘 수행으로 주기와 상한 워터마크, 하한 워터마크가 결정되며, 이전의 수행을 마치고 일정 주기의 시간이 흐른 뒤 다시 알고리즘이 수행된다. 새로운 알고리즘의 수행이 시작되면, 각 노드로부터 각 광경로의 로드 정보에 대한 정보를 수집하게 되고, 수집된 정보 중 최대의 로드 값을 가지는 광경로와 최소의 로드 값을 가지는 광경로가 이전 수행에서 결정된 상한 워터마크와 하한 워터마크와 비교되어 진다. 비교 결과, 최대의 로드 값을 가지는 광경로의 용량이 상한 워터마크를 넘게 되면 새로운 광경로를 설치하여 그 로드 값을 분담하게 되고, 최소의 로드 값을 가지는 광경로의 용량이 하한 워터마크를 넘게 되면 최소의 로드 값을 가지는 광경로를 제거하게 된다.

이 과정에서 각 노드에서의 송신 포트, 수신 포트, 광링크의 가용한 파장의 수 등의 네트워크 자원 확보와 각 광경로의 로드벨런싱을 하기 위하여 새로운 광경로의 설치와 광경로의 제거는 서로 번갈아 가면서 이루어진다. 즉, 최대의 로드 값을 가지는 광경로의 용량이 상한 워터마크를 넘었다고 하더라도, 최근의 가상 토폴로지에 대한 재구성이 새로운 광경로의 설치였다면 다른 광경로를 제거하기 전에는 광경로의 설치를 하지 않는

```

IF latest change was deletion THEN
    Find the maximum link load MAX
    IF MAX > WH THEN
        add lightpath
    ENDIF
ENDIF

IF latest change waadditionTHEN
    Find the minimum link load Min
    IF Min < WL THEN
        delete lightpath
    ENDIF
ENDIF

adjust WH and WL

```

그림 2. 가상 토폴로지 재구성 알고리즘  
Fig. 2. Virtual Topology Restructuring Algorithm.

다. 이와 같은 정책은 한 시점에서는 워터마크를 넘긴 광경로에 대한 대응을 하지 못하는 문제가 있지만, 동적으로 워터마크를 조절하기 때문에 점진적으로 광경로에 대한 로드밸런싱을 이룰 수 있게 된다.

최근의 가상 토폴로지에 대한 재구성이 저부하 광경로에 대한 제거였고, 현재의 과부하 광경로의 로드가 상한 워터마크를 넘게 되면 새로운 광경로의 설치가 이루어지는데, 새로 설치되는 광경로의 출발지 노드와 목적지 노드의 결정은 과부하 광경로를 이용하여 가장 큰 로드를 가진 다중 홉 트래픽의 양 끝 노드로 결정한다. 광경로의 새로운 설치나 제거가 있을 때마다 모든 패킷 트래픽에 대한 라우팅이 다시 계산되어진다.

[그림 2]는 본 논문에서 제안하는 기법을 의사코드(pseudo code)로 나타낸 것으로서, WH는 상한 워터마크를 나타내며, WL은 하한 워터마크를 나타낸다. 가장 아랫줄의 WH, WL에 대한 조정은 아래의 식 (3), 식 (4) 의해 결정된다. 즉, 조정된 WH와 WL의 값을 가지고 위의 알고리즘을 계속적으로 반복하여 수행하게 된다.

제안한 기법에서 반복적으로 사용되는 상한 워터마크와 하한 워터마크는 다음의 식에 의하여 동적으로 결정된다.

$$\delta_H = WH - MAX \quad (1)$$

$$\delta_L = WL - MIN \quad (2)$$

$$WH_{t+1} = WH_t - \Delta \cdot \delta_H \quad (3)$$

$$WL_{t+1} = WL_t - \Delta \cdot \delta_L \quad (4)$$

식 (1)과 식 (2)에서 WH와 WL은 각각 상한 워터마크와 하한 워터마크를 나타내며, MAX는 현 수행 시점에서 최대 로드 광경로의 광경로 용량에 대한 비이며, MIN는 최소 로드 광경로의 광경로 용량에 대한 비이다. 즉,  $\delta_H$ 는 현 시점에서의 상한 워터마크의 값과 MAX 값의 차이를 나타내며,  $\delta_L$ 는 하한 워터마크 값과 MIN 값의 차이를 나타낸다. 식 (3)과 식 (4)에서 t는 현재 수행의 시간을, t+1은 다음 수행의 시간을 나타내며  $\Delta$ 는 시스템 인수로서 0에서 1사이의 값을 가지게 된다.

#### IV. 실험

기존의 고정 워터마크 기법과 제안한 동적 워터마크 기법과의 로드밸런싱 측면에서의 차이를 밝히기 위해서 각각 24시간, 48시간, 72시간, 96시간, 120시간 동안 실험을 수행하였다. WH와 WL의 초기값은 각각 70, 10이었으며,  $\Delta$ 는 0.5로 설정하였다. 주어진 시간 동안 실험을 하면서, 수행 주기마다 모든 광경로의 부하를 수집하였으며, 이에 대한 표준편차를 조사하였다. 그 결과가 <표 1>에 나타나 있으며, 제안기법이 기존기법보다 로드밸런싱 측면에서 약 23%정도의 성능 향상을 보인다.

표 1. 기존 기법<sup>[2]</sup>과 제안 기법의 광경로 표준편차 비교

Table 1. Comparison of wavepath standard deviation with previous scheme<sup>[2]</sup> and proposed scheme.

실험시간	24시간	48시간	72시간	96시간	120시간
기본기법	103.62	99.77	96.16	97.19	98.56
제안기법	79.82	77.54	75.03	73.91	74.21

#### V. 결론

본 논문에서는 실제 트래픽 패턴에 대한 고찰을 통하여 가상 토폴로지의 재구성에 대한 새로운 관점에서, 기존 기법과는 다른 동적 워터마크 결정을 이용한 온라인 재구성 및 로드밸런싱 기법을 제안하였다. 제안한 기법의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 제안한 동적 워터마크 결정 기법이 목표했던 바를 충족시킴을 보였다. 즉, 로드밸런싱면에 있어서 기존의 고정 워

터마크 기법에 비해서 23%의 성능 향상을 보였다. 둘째, 워터마크 결정 단계에서 동적 워터마크 결정 인수인  $\Delta$ 를 시스템 인수로 함으로써 시스템 운영자를 위한 유연성을 부여하였다. 마지막으로, 최대 부하 광경로와 최저 부하 광경로의 시간에 따른 변화 추이를 통하여, 본 논문에서 제안한 동적 워터마크 결정 기법이 트래픽의 변동에 능동적으로 대처하고 있음을 보였다.

향후 과제로는 각 노드로부터 광경로 사용도에 대한 정보를 수집하기 위한 구체적인 신호 처리 방안과 전체적인 트래픽 양인 급격히 증가할 경우, 트래픽의 변화를 따라가는 워터마크 또한 급격하게 변함으로 인해 발생하는 네트워크 혼잡을 해소하는 방안에 대한 연구가 향후 연구과제라 하겠다. 또한, 네트워크의 크기가 커짐에 따라 제안한 기법에서 사용한 중앙 집중적인 방식의 문제점을 해소하기 위한 국소 정보를 이용한 로드밸런싱 기법에 대한 연구 역시 향후 과제이다.

### 참고 문헌

- [1] R. Ramaswami and G. H. Sasaki, "Multiwavelength optical networks with wavelength conversion", Proc. IEEE INFOCOM, pp. 489-498, 1997.
- [2] A. Genata and B. Mukherjee, "Virtual-Topology Adaptation for WDM Mesh Networks Under Dynamic Traffic", IEEE Infocom 2002 Conference, vol.1, pp. 48-56, Jun. 2002.
- [3] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 4, no. 5, pp. 684-696, Oct. 1996.
- [4] R. M. Krishnaswamy and K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies: A linear formulation for wavelength-routed optical networks with no wavelength changers", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 9, no. 2, pp. 186-198, Apr. 2001.
- [5] H. Zang and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks" Optical Networks Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 47-60, Jan. 2000.

### 저 자 소 개

남 정 주(정회원)

2001년 서강대학교 컴퓨터학과 학사 졸업.

2003년 서강대학교 컴퓨터학과 석사 졸업.

<주관심분야 : WDM, 병렬처리시스템>



김 성 천(정회원)

1975년 서울대학교 공과대학

공업교육학(전기전공)학사

1979년 Wayne State Univ.

컴퓨터공학 공학석사

1982년 Wayne State Univ.

컴퓨터공학 공학박사

1982년~1984년 캘리포니아주립대 조교수

1984년~1985년 금성반도체(주) 책임연구원

1986년~1989년 서강대학교 공과대학 전자계산소  
부소장

1989년~1991년 서강대학교 공과대학

전자계산학과 학과장

1985년~현재 서강대학교 공과대학 컴퓨터학과

교수(1992.9~현재)

1989년~현재 한국정보과학회 병렬처리시스템

연구회 부위원장(1989~1993), 위원장

(1994~1997), 대한전자공학회 및 한국통

신학회 논문지 편집위원(1991~현재,

1993~현재)

<주관심분야 : 병렬처리시스템, 상호연결망,

WDM 네트워크>