

# 동적인 WDM 네트워크에서 가상 링크의 불연속성을 감소시키는 파장 할당 기법

유 승 연<sup>†</sup> · 김 성 천<sup>\*\*</sup>

## 요 약

파장 할당에 대해 제안된 알고리즘들의 대부분은 무한한 수의 ADM을 가정하여 I/O 블로킹을 배제하였으며 파장을 할당한 이후, 네트워크 내에 파장이 불연속적인 형태로 남게 되어 링크 블로킹을 증가시킬 수 있다는 문제점이 있다. 또한 최악의 경우  $O(W \cdot N^3)$ 의 시간 복잡도를 갖는다. 본 논문에서는 온라인 상에서 동적인 트래픽 요청에 대해 최악의 경우  $O(W \cdot N^2)$ 의 복잡도를 가지면서 I/O 블로킹과 링크 블로킹을 모두 고려하는 파장 할당 알고리즘을 제안하였다. 파장의 불연속성을 최소화함으로써 블로킹의 발생을 감소시킬 수 있었다.

키워드 : WDM 네트워크, 파장 할당, 가상 링크, 블로킹

## Wavelength assignment algorithm to reduce discontinuity of virtual links in dynamic WDM network

You Seung Yeon<sup>†</sup> · Kim Sung Chun<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

Most wavelength assignment algorithms assume that every node has infinite ADMs and I/O blocking is excluded. Furthermore wavelengths continue to occur intermittently in the network using existing algorithms. This can result in increased link blocking under dynamic traffic circumstances. In addition, it can create time-complexity problems such as  $O(W \cdot N^3)$  in the worst case scenario. In this paper, we propose a new wavelength assignment algorithm which has time-complexity of  $O(W \cdot N^2)$  and considers both I/O and link blocking. The basic idea is to maximize the number of links where wavelengths will be assigned continuously after present assignment. As a result, the number of intermittent wavelengths is minimized, and blocking probabilities are decreased.

Key Words : WDM Networks, Wavelength Assignment, Virtual Link, Blocking Probability

### 1. 서 론

WDM(Wavelength Division Multiplexing)은 여러 데이터를 하나의 광섬유에 함께 실는 기술로서, 각 신호들은 분리된 고유의 광파장 상에서 전송된다. 각 채널은 수신측에서 원래의 신호대로 역다중화 되기 때문에 각기 다른 속도의 각기 다른 데이터 형식들이 함께 전송될 수 있다. 보다 명확히 말하자면, 인터넷 데이터, SONET 데이터, ATM 데이터 등이 광섬유 내에서 모두 동시에 전송될 수 있다는 뜻이다. WDM은 광섬유 부족 문제를 해결함으로써 미래의 광네트워크의 중심 기술이 될 것으로 예상된다. WDM 기술을 이용한 네트워크에서 통신을 가능하게 하기 위해 광경로를 설정하는 것을 RWA(Routing and Wavelength Assignment)

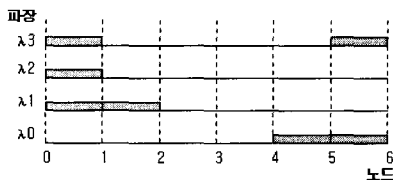
문제라고 하는데, 파장을 라우팅하고 적절하게 할당하는 문제를 말한다. 광경로는 물리적인 광섬유 경로와 논리적인 링크인 파장이 모두 결정된 후에야 셋업(setup)될 수 있기 때문이다. 이 때 물리적인 링크는 라우팅을 통해서, 논리적인 링크는 파장 할당을 통해서 결정되며 이 두 가지 문제는 독립적으로 수행된다[1-3]. 본 논문에서는 최단 경로 라우팅 알고리즘을 사용한다. 그리고 동적인 WDM 네트워크에서 블로킹 발생률을 감소시키는 파장 할당 기법을 제안한다.

파장을 할당했을 때, 데이터가 광신호로 전송된 후 목적지 노드까지의 경로 중간에 전자적인 신호로의 변환을 거치는 것을 다중홉 네트워크라고 하며 광/전자 변환이 없는 경우를 단일홉 네트워크라고 한다. 다중홉 네트워크는 중간 노드에서 라우팅을 하기 위해 광/전자 변환을 수행하므로 시간적인 오버헤드가 크며, 노드들이 변환기를 모두 갖고 있어야 하기 때문에 비용이 많이 든다는 단점이 있다[3]. 이러한 이유로 본 논문에서는 단일 홉 WDM 네트워크 환경을 가정한다.

※ 이 연구는 서강대학교 산업기술 연구소 지원에 의하여 이루어졌습니다.  
<sup>†</sup> 정 회 원 : 서강대학교 공과대학 컴퓨터학과 박사과정(수료)  
<sup>\*\*</sup> 정 회 원 : 서강대학교 공과대학 컴퓨터학과 정교수  
 논문접수: 2005년 11월 1일, 심사완료: 2006년 3월 10일

## 2. 기존의 파장 할당 기법

파장 할당에 관련하여 S.Xu, L.Li, S.Wang, C.Chen의 연구[4]와 X.Zhang, C.Qiao의 연구[5], Jing Teng, George N. Rouskas의 연구[6]를 비롯한 다수의 연구가 있다. 이 연구들은 동적인 트래픽 환경에서 블로킹 발생률을 최소화하고자 했지만 ADM(Add/Drop Multiplexer) 이용률, 시간 복잡도, 다양한 트래픽 분포 등을 고려하지 않아 동적인 네트워크 환경에 적용하기에는 부적합하다. 하지만 최근 2, 3년 사이에는 네트워크 비용을 최소화할 수 있는 파장 할당에 대해 X.Yuan, A.Fulay, O.Gerstel, P.Lin, G.Sasaki 등 많은 이들이 활발한 연구를 하고 있다. 특히 X.Yuan과 G.Sasaki의 연구가 두드러지며 성능 평가의 기준은 주로 사용되는 ADM의 수 혹은 공유 ADM의 수가 된다. ADM의 수는 네트워크 비용 뿐만 아니라 I/O 블로킹에도 직접적인 영향을 주며 노드의 부하 균등 정도를 측정하는 기준이 되기도 한다[7-11]. 파장 할당에 대해 현재까지 제안된 대표적인 알고리즘으로는 random wavelength assignment, first-fit, least-used, most-used, least loaded, MAX\_SUM, relative capacity loss(RCL)가 있다[1, 3]. 이 중 동적인 환경을 고려하여 블로킹 발생률을 효과적으로 감소시킨 것은 RCL 알고리즘[4]이며 이를 분산 환경에 적용하고자 확장한 연구[12]도 있었다. RCL 알고리즘 역시 송/수신기의 수가 무한하다고 가정함으로써 I/O로 인한 블로킹을 배제하고 있다. 간략히 RCL 알고리즘을 살펴보겠다. 현재 네트워크 상황이 (그림 1)과 같다고 가정하고 노드2에서 노드4까지의 트래픽(2, 4) 요청이 발생하면 4개의 파장 중 하나가 할당되어야 한다.



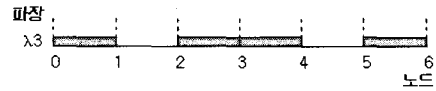
(그림 1) 예제 네트워크

(2, 4)에 파장이 할당된다고 했을 때 영향을 받을 수도 있는 링크는  $p_1(1, 3)$ ,  $p_2(1, 5)$ ,  $p_3(3, 6)$ 이 되며 각 링크가 블로킹 될 확률을 파장별로 계산하여 블로킹 확률을 최소화 하는 파장을 선택하는 기법이다. 하지만 동적인 네트워크 환경에서 영향을 받을 링크를 미리 알 수 없기 때문에  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ 를 고려하는 것이 무의미할 수 있다. 한 예로  $p_1(1, 3)$  이외에도 (1, 2), (2, 3) 등의 트래픽 요청이 있을 수 있기 때문이다. RCL 기법의 가장 큰 문제점은 네트워크 상에 불연속적인 파장을 발생시킨다는 것이다. 이 문제에 대해서는 다음 절에서 자세히 소개한다.

## 3. 제안 기법

(그림 1)의 네트워크 상황에서 트래픽 요청 (2, 4)가 발생

한 경우, RCL 기법을 이용하면 파장  $\lambda_3$ 가 선택된다. (그림 2)에서 보는 바처럼  $\lambda_3$ 는 불연속적인 가상 링크의 형태로 네트워크에 존재하게 되는데, 이처럼 가상 링크의 길이가 짧은 불연속적인 링크가 많이 존재한다면 잠재적으로 네트워크 블로킹 발생을 증가시키게 된다.



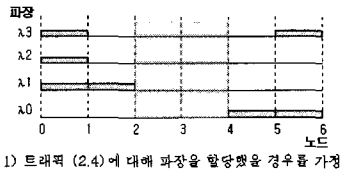
(그림 2) RCL 기법 적용 결과

파장 하나를 컴퓨터의 메모리로 생각하면, 불연속적인 파장으로 인한 블로킹을 external fragmentation(외부 단편화) 문제로 이해할 수 있다. 이를 간략하게 설명하면, 프로세스가 몇 번 교체되고 나면 각 프로세스 크기의 차이로 발생하는 많은 빈 공간들이 발생하게 되고, 이런 작은 공간들은 새로운 프로세스를 수용하기에는 너무 작아 버려진 공간이 된다. 이러한 공간을 외부 단편이라 한다. 단지 이 문제와 파장 할당을 비교했을 때 차이점이 있다면, 메모리의 경우는 운영체제가 주기적으로 외부 단편들을 모아서 사용이 가능하나, 단일 홉 WDM 네트워크에서는 불가능하다는 점이다. 출발지 노드 s에서 목적지 노드 d까지의 경로에 파장을 할당하는 것이므로, 라우팅에 의해 결정된 경로를 따라 할당이 되어야 하기 때문에 빈 링크들을 메모리처럼 가상적으로 연결하는 식으로는 문제를 해결할 수 없기 때문이다. 동적인 네트워크 환경에서는 어떤 트래픽 요청이 있을지 확실하게 예측하는 것이 어렵기 때문에 어떤 트래픽에 대해서도 최대한 블로킹을 발생시키지 않으려면 현재 네트워크 상황을 고려하여 트래픽 요청에 파장을 할당한 이후에 네트워크에 불연속적인 링크를 가장 적게 유지해야 한다.

본 논문에서 사용할 몇 가지 용어 정의를 하겠다. 링크는 물리적으로 한 홉에 해당하는 경로라 하겠다. 즉, 가상 링크는 물리적으로는 한 홉인 경로의 파장 채널을 의미한다. 하나 이상의 연속적인 가상 링크 집합을 세그먼트라고 정의하는데, 이 때 세그먼트를 구성하는 가상 링크는 할당 가능한, 다시 말해서 현재 사용되지 않고 있는 가상 링크를 말한다.  $S_{\lambda,i}$ 는 파장  $\lambda$ 에서 i번째 세그먼트를 나타내며 이것의 크기는  $|S_{\lambda,i}|$ 로 표현한다. 그리고  $N(S_{\lambda})$ 은 파장  $\lambda$ 가 포함하고 있는 세그먼트의 개수를 가리킨다. (그림 2)의  $\lambda_3$ 를 예로 설명하면,  $S_{\lambda_3,1}$ 은 (1, 2) 세그먼트를,  $S_{\lambda_3,2}$ 는 (4, 5) 세그먼트를 가리킨다. 이 때 세그먼트의 크기를 나타내면  $|S_{\lambda_3,1}|=1$ 이고  $|S_{\lambda_3,2}|=1$ 이며,  $N(S_{\lambda_3})=2$ 가 된다. 제안 기법의 목적은 크기가 작은 세그먼트를 많이 보유하고 있는 파장의 수를 최소화함으로써 블로킹 발생 확률을 감소시키는 것이다. 이를 구현하기 위한 핵심 아이디어는 새로운 트래픽 요청에 파장을 할당한 이후, 네트워크에 세그먼트를 가장 적게 발생시키는 파장을 선택하는 것이다. 파장의 할당 후, 네트워크 내에 불연속적인 링크를 줄이기 위해서 할당 이후에 평균 세그먼트의 길이가 가장 긴 파장을 선택한다. 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Max}_\lambda \frac{\sum_i |S_{\lambda,i}|}{N(S_\lambda)} \quad (\text{식 1})$$

식1의 값을 최대로 하는 파장  $\lambda$ 를 선택하게 되는데, 이는 세그먼트의 개수는 작으면서 세그먼트의 길이는 길어서 평균 세그먼트의 길이가 가장 긴 파장을 선택하기 위함이다. 이 기법을 적용하기 위해 네트워크에서는 파장 할당을 위한 라우팅 테이블을 유지하고 있어야 한다. 아래 (그림 3)은 제안 기법을 적용하는 과정을 보여주고 있다.



$\lambda$	$X = \sum_i  S_{\lambda,i} $	$Y = N(S_\lambda)$	$X/Y$
$\lambda 3$	2	2	1
$\lambda 2$	3	2	1.5
$\lambda 1$	2	1	2
$\lambda 0$	2	1	2

2) 제안 기법을 적용하여 연산을 수행하는 과정

(그림 3) 제안 기법 적용 과정

$\lambda 1$ 과  $\lambda 0$ 는 같은 값을 가지므로 어떤 파장을 선택해도 상관 없다. 인덱스가 작은  $\lambda 0$ 를 선택했을 때의 결과는 아래 (그림 4)와 같으며 RCL 기법을 적용한 것에 비해 불연속적인 파장이 감소되는 것을 확인할 수 있다.



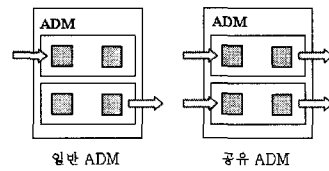
(그림 4) 제안 기법 적용 결과

제안 기법의 알고리즘 복잡도를 분석해보겠다. 모든 가능한 패스(path)에서 한 패스의 최대 길이, 즉 패스를 구성하는 최대 링크 수는  $L$ 로 표시한다. 하나의 파장에 대해 세그먼트의 개수와 길이를 계산하기 위해  $O(L)$ 의 복잡도가 요구된다. 그리고 세그먼트마다의 길이를 비교하여 최대값을 얻기 위한 계산 복잡도는  $O(|S_{\lambda,i}|)$ 와 같다. 그러므로 네트워크에서 사용 가능한 전체 파장의 개수를  $W$ 라 할 때 전체 알고리즘의 계산 복잡도는  $O(W \cdot L \cdot |S_{\lambda,i}|)$ 가 된다.  $L$ 은 전체 노드의 수  $N$ 을 넘지 않고, 세그먼트의 개수는  $L$ 을 넘지 않으므로  $N$ 을 넘지 않는다고 할 수 있다.  $L \leq N, |S_{\lambda,i}| \leq N$ . 그러므로 제안 기법의 알고리즘 복잡도는  $O(W \cdot N^2)$ 이 되며, 기존의 RCL 기법의 복잡도인  $O(W \cdot N^3)$ 에 비해 감소됨을 알 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션

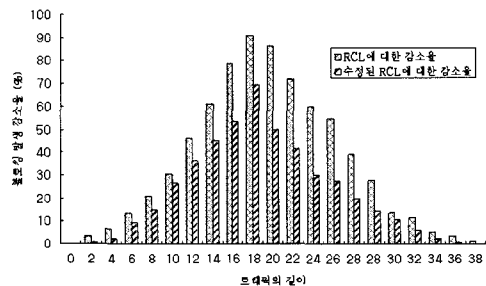
기본적으로 링 네트워크를 가정하고 공유 ADM 사용을

가정한다. 기존의 연구는 ADM의 수가 무한하다는 가정을 함으로써 I/O 블로킹 발생을 배제시켰다. 또한 ADM의 수가 무한하기 때문에 ADM의 이용률이 낮아도 블로킹과는 무관하므로 (그림 5)에서 보여지는 일반 ADM을 사용했었다. 출발지 노드는 ADM 내의 송/수신기 중 송신기만을 사용할 것이고 목적지 노드는 수신기만을 사용하게 될 것이다. 이 때 일반 ADM에서는 송/수신기를 하나의 쌍으로 고려하여 송신기가 사용되고 있는 ADM의 수신기는 사용을 할 수가 없게 된다. 다시 말해서 송/수신기를 송신기나 수신기 중 하나의 역할로만 사용하게 되고, 이는 ADM 이용률을 낮추는 요인이 된다. 이러한 이유로 본 논문에서는 (그림 5)의 공유 ADM을 가정한다. 이는 송신기와 수신기를 독립적으로 고려하여 각각 사용할 수 있는 ADM 개념이다. 물론 사용 ADM의 수에도 제한을 두어 보다 현실적인 환경을 고려하였다. 또한 공유 ADM을 사용할 때의 RCL 기법의 성능을 고려할 수 있도록 수정하여 수정된 RCL 기법과도 시뮬레이션 비교를 하였다.

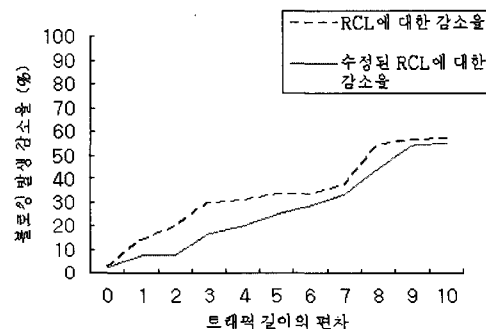


(그림 5) ADM과 공유 ADM

(그림 6)은 트래픽 길이에 따른 상대적인 블로킹 발생 감소율을 보여준다. 트래픽 길이가 0이란 것은 자기 자신에게 트래픽을 보낸다는 의미이다. 수정된 RCL 알고리즘에 비해 제안 기법이 블로킹 발생을 감소시키기를 확인할 수 있다.



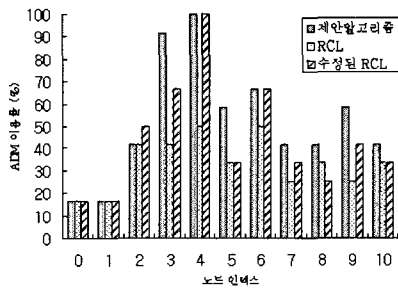
(그림 6) 트래픽 길이에 따른 상대적인 블로킹 발생 감소율



(그림 7) 트래픽 길이 편차에 따른 상대적인 블로킹 발생 감소율

(그림 7)은 트래픽 길이 편차를 고려한 실험 결과이다. 트래픽 길이 편차가 0이라는 것을 예로 들어 설명하겠다. 현재 트래픽이 (3, 5)라 가정하고 다음 트래픽이 (2, 4)라 했을 때, 현재 트래픽과 다음 트래픽이 모두 2홉으로 길이가 같음을 의미한다. 즉 (그림 7)은 발생하는 트래픽의 평균 길이 편차에 대하여 상대적인 블로킹 발생 감소율을 나타내고 있다. 길이 편차가 커질수록, 다시 말해서 보다 다양한 길이의 트래픽이 발생할 때 제안 기법이 더 효과적임을 알 수 있다. 평균 약 27%까지 블로킹 발생을 감소시켰다.

(그림 8)은 여러 실험 중 임의의 한 실험에 대한 결과인데, 각 노드별 ADM 이용률을 보여주고 있다. 공유 ADM을 사용하는 경우는 최대 100%의 이용률을 보여주고 있다. 수정된 RCL 알고리즘과 제안 기법은 둘 다 공유 ADM을 사용하지만 제안 기법이 RCL에 비해 블로킹 발생을 감소시키기 때문에 더 많은 할당이 가능하게 된다. 그 결과로 ADM이 수정된 RCL 기법에 비해 평균 10% 정도 높게 이용되고 있음을 알 수 있다.



(그림 8) 노드별 ADM 이용률의 예

### 5. 결론

본 논문에서는 단일 홉 네트워크를 가정하며, 동적인 트래픽 요청에 대해 최악의 경우  $O(W \cdot N^2)$ 의 복잡도를 가지면서도 I/O 블로킹과 링크 블로킹을 모두 고려할 수 있는 파장 할당 기법을 제안하였다. 파장의 할당 이후 네트워크에서 파장의 불연속성을 최소화함으로써 블로킹 발생을 감소시켰다. 선행 연구였던 RCL 알고리즘과 공유 ADM을 사용하도록 수정된 RCL 알고리즘을 비교 대상으로 하여 제안 알고리즘의 성능을 분석한 결과, 트래픽 길이 편차에 대해서는 기존 RCL 알고리즘과 수정된 RCL 알고리즘에 비교하여 각각 약 20%와 10%의 성능 향상이 있었다. 시간복잡도 측면까지 고려한다면 제안 기법이 기존에 비해 보다 현실적으로 동적인 파장 할당을 가능하도록 해준다.

### 참고 문헌

[1] H. Zang, J. P. Jue 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.  
 [2] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive Wavelength Routing in All-Optical Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.7, Issue 5, pp.779~786, Oct., 1999.

[3] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive Wavelength Routing in All-Optical Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.6, No.2, pp.197~206, Apr., 1998.  
 [4] S. Xu, L. Li, S. Wang and C. Chen, "Wavelength Assignment for Dynamic Traffic in WDM Networks", Proceedings. IEEE International Conference, pp.375~379, 2000.  
 [5] X. Zhang and C. Qiao, "Wavelength Assignment for Dynamic Traffic in Multi-fiber WDM Networks", International Conference on Comp Comm and Networks, pp.479~485, Oct., 1998  
 [6] Jing Teng and George N. Rouskas, "On Wavelength Assignment in Optical Burst Switched Networks", IEEE BROADNETS'04, 2004.  
 [7] Quang-Dzung HO and Man-Seop LEE, "Converter-Aware Wavelength Assignment in WDM Networks with Limited-Range Conversion Capability", IEICE TRANS. COMMUN., Vol.E89-B, No.2 Feb., 2006.  
 [8] R. Kandula and G. Sasaki, "Grooming of Dynamic Tributary in WDM Rings with Rearrangements", 39th Allerton Conference, Monticello IL, Oct., 2001.  
 [9] H. Ghafouri-Shiraz, G. Zhu and Y. Fei, "Effective Wavelength Assignment Algorithms for Optimizing Design Costs in SONET/WDM Rings", Journal of Lightwave Technology, Vol.19, No.10, pp.1427~1439, Oct., 2001  
 [10] L. Liu, X. Li, P. Wan and O. Frieder, "Wavelength Assignment in WDM Rings to Minimize SONET ADMs", IEEE INFOCOM, Vol.2, pp.1020~1025, 2000.  
 [11] X. Yuan and A. Fulay, "Wavelength Assignment to Minimize the Number of SONET ADMs in WDM Rings", IEEE International Conference on Communications, New York, April, 28-May 2, 2002.  
 [12] R. Dante, E. Moschim, and J. Martins-Filho, "Modified distributed relative capacity loss algorithm for WDM optical networks," J. Opt. Networks.4, pp.271~284, 2005.

### 유 승 연



e-mail : asura@sogang.ac.kr  
 2001년 서강대학교 컴퓨터학과(학사)  
 2003년 서강대학교 대학원 컴퓨터학과(공학석사)  
 현재 서강대학교 대학원 컴퓨터학과(박사과정수료)  
 관심분야: 클러스터 시스템, WDM 네트워크, 토폴로지 재구성 등

### 김 성 천



e-mail : ksc@sogang.ac.kr  
 1975년 서울대학교 공업교육학과(학사)  
 1979년 Wayne State Univ. 컴퓨터공학과(공학석사)  
 1982년 Wayne State Univ. 컴퓨터공학과(공학박사)  
 1982년~1984년 캘리포니아주립대 조교수  
 1984년~1985년 금성반도체(주) 책임연구원  
 1985년~현재 서강대학교 컴퓨터학과 교수  
 1989년~1997년 한국정보과학회 병렬처리시스템 연구회 부위원장(1989~1993), 위원장(1994~1997)  
 1991년~현재 대한전자공학회 논문지 편집위원  
 1993년~현재 한국통신학회 논문지 편집위원  
 관심분야: 병렬처리시스템, 상호연결망, WDM 네트워크