

파장 분할 다중화 (WDM) 망의 분산 파장 할당 알고리즘

정희원 이 쌍 수*, 이 창 형*, 서 승 우*, 장 문 종**

Distributed Wavelength Assignment Algorithm in WDM Networks

Ssang-soo Lee*, Chang-hyung Lee*, Seung-woo Seo*, Moon-jong Jang** *Regular Members*

요 약

본 논문은 파장 변환기를 가지고 있지 않는 파장 분할 다중화 (WDM) 망에서 동적인 분산 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 고정 라우팅 경로에 부분적으로 가장 많이 사용되는 파장을 분산적으로 할당한다. 우선, 파장 할당되는 광 경로 (lightpath) 의 라우팅 경로에 연결된 모든 광섬유로 이루어진 샘플 공간을 정의하여 제안된 알고리즘을 정형화한다. 특히, 기존의 파장 분할 다중화 망을 위해 제안된 중앙 집중식 제어의 MU 파장 할당 알고리즘^[1]과 비교하여 블록킹 (blocking) 성능을 수학적으로 분석한다. 또한, $M/M/c/c$ 동적 트래픽 모델을 사용한 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘을 비롯하여 다른 중앙 집중식 제어와 분산 제어의 파장 할당 알고리즘의 블록킹 성능에 대한 수치적인 결과를 얻는다. 결론적으로, 수학적 분석 결과가 실제 시뮬레이션 결과에 잘 맞음을 보이고 제안된 알고리즘이 블록킹 성능, 제어 트래픽 부하, 그리고 계산의 복잡도의 관점에서 파장 분할 다중화 망을 위한 효율적인 분산 제어 방식이라는 것을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient dynamic wavelength assignment algorithm in distributed WDM (Wavelength-Division Multiplexing) networks without wavelength conversion. The algorithm tries to assign a locally-most-used wavelength distributedly on a fixed routing path. We first formulate our algorithm by using the concept of a sample space which consists of optical fibers connected to nodes on a routing path of a lightpath to be assigned a wavelength. In particular, we analyze the blocking performance mathematically as compared with that of the most-used (MU) wavelength assignment algorithm^[1] previously proposed for WDM networks under centralized control. We also obtain numerical results by simulation on the blocking performance of other centralized/distributed wavelength assignment algorithms as well as our algorithm using the $M/M/c/c$ dynamic traffic model. Consequently, we show that analytical results match simulation results and that our algorithm is efficient in distributed WDM networks in terms of blocking performance, control traffic overhead and computation complexity.

I. 서론

파장 분할 다중화(WDM)에 기초한 전광 (all-optical) 망은 폭발적으로 증가하는 데이터 트래픽을

전송하기 위한 유망한 대안으로 부상되어 왔다. 전광 망 전송은 광/전 변환 없이 시작 (source) 노드에서 목적 (destination) 노드까지 데이터를 전송하는 것으로, 망 관리를 단순화하고 광/전 변환으로 인한 막힘 현상 (bottleneck)을 극복할 수 있다. 뿐

* 서울대학교 전기공학부(sseo@snu.ac.kr),

** 전력연구원 전력계통연구실 정보통신그룹(mjjang@kepri.re.kr)

논문번호 : 99487-1207, 접수일자 : 1999년 12월 7일

만 아니라, 파장 분할 다중화 기술을 이용할 경우 하나의 광섬유 (optical fiber) 는 초당 기가 비트 단위의 전송 속도를 가지는 여러 채널을 수용할 수 있다.

현실적인 회선 스위칭 모드에서 콜 요청 (call request) 은 광 스위치를 가지는 여러 개의 노드 사이에 직접적인 광 경로를 설정함으로써 구현된다.^{[2],[3]} 파장 변환기가 없는 광 경로는 해당되는 회선 상에 있는 모든 광섬유에서 공통적으로 사용되지 않는 파장을 요구한다. 이러한 요구 사항은 파장 연속 제약이라고 알려져 있으며 파장 변환기가 있는 경우에 비해서 더 큰 블로킹 (blocking) 확률을 유발한다. 파장 변환기의 있고 없음에 따라, 파장 분할 다중화 망에서의 콜 블로킹 성능에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다^{[4],[5],[6]}. 광섬유에서 지원되는 파장의 수가 증가함에 따라, 파장의 효율을 개선하기 위해, 물리적 망상에서 광 경로를 어떻게 라우팅 하며 무슨 파장을 광 경로에 할당할 것인가에 대한 문제 (RWA or Routing and Wavelength Assignment) 는 더욱더 중요하게 되었다. 파장 분할 다중화 망에서 라우팅 및 파장 할당 문제는 휴리스틱 알고리즘과 최적 알고리즘의 관점에서 광범위하게 연구되어 왔다^{[1],[7]-[13]}. 그러한 알고리즘은 전체 망을 관리하고 제어하는 감독 (supervisory) 노드의 유무에 따라 중앙 집중식 제어 또는 분산 제어 방식으로 동작된다. 예를 들면, MU 파장 할당 알고리즘^[1]은 감독 노드가 전체 망에서 가장 많은 광섬유에서 사용되는 파장을 할당하기 때문에, 중앙 집중식 제어 방식으로 동작한다. 일반적으로, 중앙 집중식 제어 방식의 라우팅 및 파장 할당 알고리즘이 더 최적인 반면, 감독 노드가 전체 망 상태에 대한 정보를 항상 관리하기 위해 더 큰 제어 트래픽 부하를 요구하며 더 큰 계산상의 복잡도를 가진다. 그러므로, 망의 성능을 개선하기 위해서는 최적성과 제어 트래픽의 부하 사이에서 절충이 필요하다.

본 논문에서는 임의의 시작 노드와 목적 노드가 하나의 광 경로로 연결되는 단일 홉의 회선 스위칭 방식의 파장 분할 다중화 망을 고려한다. 이러한 망 모델에서 고정 라우팅 경로 상에서의 분산 파장 할당 문제를 다루기로 한다. 라우팅 경로는 기존의 라우팅 알고리즘에 의해 미리 정해진다. 트래픽 모델로는 $M/M/c/c$ 의 동적 트래픽 모델을 사용하여 분석과 시뮬레이션에 사용한다. 본 논문에서는 LMU 파장 할당 알고리즘을 제안하는데, 이 알고리즘은 전체 망 대신에 샘플 공간에서 가장 많이 사용되는

파장을 고정 라우팅 경로에 할당하는 것이다. 샘플 공간은 <그림 1>에서와 같이 광 경로의 라우팅 경로상에 있는 노드에 연결되는 광섬유의 집합이다. 이리하여, 감독 노드가 망의 전체 상태에 관한 정보를 관리하기 위해 큰 제어 트래픽 부하를 필요로 하는 기존의 고정 라우팅 경로상의 MU 알고리즘과는 달리, 제안된 알고리즘은 작은 트래픽 부하를 가지고 분산적으로 수행된다. 특히, 하나의 광섬유 상에서 파장의 사용 여부에 대한 상태가 다른 광섬유의 것과 독립적이라고 가정하고 블로킹 확률을 수학적으로 유도하고 분석적 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 제안된 분산 파장 할당 알고리즘이 효율적이라는 것을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2장에서는 파장 분할 다중화 망에서 분산 제어 방식의 LMU 알고리즘을 정형화한다. 제 3장에서는 제안된 알고리즘의 블로킹 성능을 중앙 집중식 제어 방식의 MU 알고리즘과 비교하여 분석한다. 제 4장에서는 $M/M/c/c$ 동적 트래픽 모델을 사용하는 시뮬레이션을 통하여 여러 가지 파장 할당 알고리즘의 블로킹 확률에 대한 수치적인 결과를 보인다. 끝으로, 제 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. LMU 파장 할당 알고리즘

이 장에서는 고정 라우팅 경로를 사용하는 파장 분할 다중화 망에서 LMU 알고리즘을 제안한다. LMU 알고리즘은 샘플 공간에서 가장 많이 사용되는 파장을 고정 라우팅 경로에 할당한다. 이 방식은 사용 가능한 파장 중에서 샘플 공간에서의 사용률이 가장 높은 파장이 우선 순위를 가지게 하여 파장의 효율성을 높인다. 라우팅 경로상에 있는 노드는 샘플 공간에 있는 각 광 섬유에서 각 파장의 사용 상태를 알기 때문에 샘플 공간에서 가장 많이 사용되는 파장은 중앙 집중식 제어 방식의 MU 알고리즘과는 달리 분산적으로 쉽게 결정될 수 있다. 제안된 알고리즘을 정형화하기 위해 몇 가지 용어를 우선 정의한다.

정의 :

- N : 파장 분할 다중화 망의 노드 수.
- $(\lambda_i; 1 \leq i \leq W)$: 파장 분할 다중화 망에서 지원되는 파장의 수.
- I : 라우팅 경로상에서 파장 할당 전의 파장 할당 가능한 파장의 수. 즉, 파장 λ_i 는 $i \in I$

면, 라우팅 경로상의 광섬유에서 공통적으로 사용되고 있지 않는 파장이다.

- ϕ_g : 파장 분할 다중화 망의 전체 광섬유의 수.
- ϕ_i : 샘플 공간에 있는 광섬유의 수.
- $\rho_{i,i}$: 샘플 공간에서 파장 λ_i 의 사용률.

이리하여, 파장 λ_m 을 ϕ_i 개의 광섬유를 가지는 샘플 공간에서 라우팅 경로에서 할당 가능한 파장 중 가장 많이 사용되는 파장이라고 가정하면, 다음의 수식이 성립한다.

$$\rho_{i,m} = \max \{ \rho_{i,i} \mid i \in I \}. \quad (1)$$

파장의 사용 상태와 관계없이 라우팅 경로가 고정되므로 샘플 공간은 파장의 사용 상태와는 독립적이다. 파장 λ_i 가 $i \in I$ 라면, 물리적인 홉 거리가 h 인 광 경로상에서 사용되고 있지 않다는 사실을 고려한다면, λ_m 은 $(\phi_i - h)$ 개의 광섬유에서 가장 많이 사용됨을 알 수 있다.

$\rho_{i,m}$ 의 효율성을 조사하기 위해, 샘플 공간의 평균 광섬유의 수 ($\bar{\phi}_i$)와 전체 파장 분할 다중화 망의 광섬유의 수 (ϕ_g)를 비교한다. 광 경로의 평균 물리적 홉 거리를 \bar{h} 라고 하고 노드의 In-degree와 Out-degree를 똑같이 d 라고 하면, $\bar{\phi}_i$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{\phi}_i = \frac{[(\bar{h}+1) \cdot 2d] - 2 \cdot \bar{h}}{2(d-1) \cdot \bar{h} + 2d}. \quad (2)$$

또한, 다음의 수식이 성립함을 알 수 있다.

$$\phi_g = \frac{N \cdot 2d}{2} = Nd. \quad (3)$$

일반적으로, 광 경로의 평균 물리적 홉 거리 \bar{h} 는 파장 분할 다중화 망의 물리적 망 형상뿐만 아니라 가상 망 형상에 따라 결정된다. 특히, 양 방향 $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ 이차원 매쉬-토러스 (mesh-torus) 망의 경우 시작 노드와 목적 노드 사이에 설정되는

단일 홉 광 경로의 평균 물리적 홉 거리는 다음과 같다^[14]:

$$\bar{h} = \frac{2 \cdot \sqrt{N} \cdot \lfloor \frac{N}{4} \rfloor}{N-1}. \quad (4)$$

이리하여, 이 경우 수식 (2)-(4)에 의해,

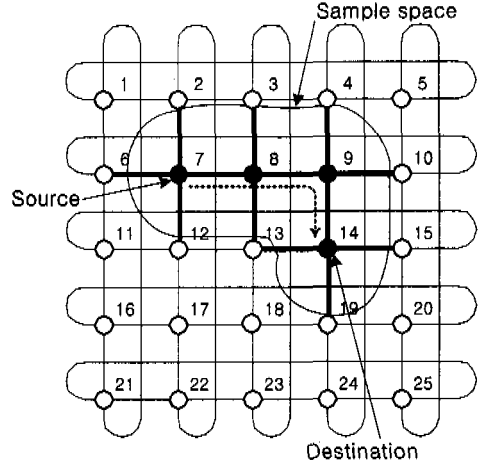


그림 1. 5 × 5 양방향 매쉬-토러스 망에서 라우팅 경로 주변 샘플 공간의 예

$$\bar{\phi}_i = O(\sqrt{N}). \quad (5)$$

따라서, 제안된 알고리즘은 $\phi_g \times O(1/\sqrt{N})$ 단위의 크기를 가지는 샘플 공간에서 분산적으로 동작하므로 이전의 중앙 집중식 제어 방식의 알고리즘보다 훨씬 적은 제어 트래픽 부하와 계산상의 복잡도를 가진다. 예를 들어, <그림 1>의 양 방향 5 × 5 이차원 매쉬-토러스 망에서 파장이 할당될 광 경로가 노드 7에서 노드 14까지라고 하자. $N = 25$, $d = 4$, 그리고 $\bar{h} = 2.5$ 이기 때문에 $\phi_g = 100$ 이고 $\bar{\phi}_i = 23$ 이다. 한편, 제안된 알고리즘은 <그림 1>에서 할당 가능한 파장 $\{\lambda_i \mid 1 \leq i \leq W\}$ 중 두꺼운 선으로 구성되는 샘플 공간에서 가장 많이 사용되는 파장 λ_m 을 광 경로에 할당하는 것이다. 단 방향 링 (ring) 구조의 망 경우는 In-degree와 Out-degree가 똑같이 1 이기 때문에 $\bar{\phi}_i$ 은 \bar{h} 보다 2 가 크다. 이 경우 비록, λ_m 이 실질적으로 광 경로에서 할당 가능한 파장 $\{\lambda_i \mid 1 \leq i \leq W\}$ 중 단지 두 개의 광섬유에서 가장 많이 사용되긴 하지만, 파장 λ_m 의 부분적인 패킹 (packing) 효과는 <그림 2>에서 보는 바와 같이 단 방향 링 망의 제한된 연결성 때문에 증가한다.

<그림 2>는 $\rho_{i,m} \neq 0$ 일 때, 라우팅 광 경로 주위에서 파장 λ_m 이 연속적으로 사용되어 파장 λ_m 이 광 경로 주위에서 집중적으로 사용되고 (패킹) 있음을 보여준다. 즉, 노드 i 에서 노드 j 까지 파장이 할당될 광 경로가 주어진다 고 하면, <그

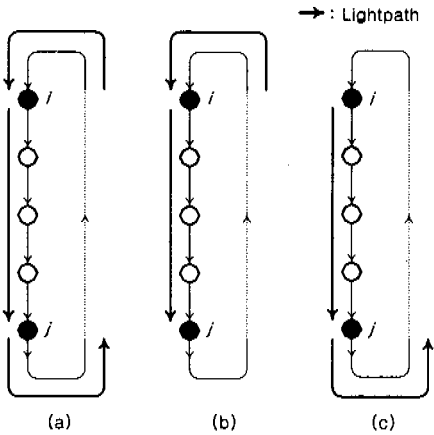


그림 2. 단방향 링 망에서 파장 λ_m의 부분적인 사용 집중화 (packing) 현상

림 2>의 (a)는 파장 할당 전에 파장 λ_m이 두 개의 인접 광섬유에서 모두 사용되는 경우이고, (b)와 (c)는 한 개의 인접 광섬유에서만 사용되는 경우이다.

III. 블럭킹 확률에 대한 분석

이 장에서는 고정 라우팅 경로 하에서 제안된 알고리즘의 블럭킹 확률을 기존의 MU 알고리즘과 비교하여 분석한다. 우선, 하나의 광섬유 상에서 파장의 사용 상태는 다른 광섬유 상에서의 것과 독립적이라는 것과 고정 라우팅 경로는 파장의 사용률과는 독립적으로 결정된다고 것을 가정한다. X_{g,i}는 전체 망에서 파장 λ_i가 사용되는 광섬유의 수라고 하고, X_{l,i}는 샘플 공간에서 파장 λ_i가 사용되는 광섬유의 수라고 정의하자. 앞 장에서와 같이 파장 λ_m은 라우팅 경로에서 사용되고 있지 않은 파장 중, φ_l개의 광섬유에서 부분적으로 가장 많이 사용된다고 한다. v를 광 경로의 라우팅 경로에서 사용되고 있지 않은 파장의 수이고 파장의 평균 사용률을 ρ̄라고 가정하면, X_{l,m}의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 P_{X_{l,m}} &= \Pr(X_{l,m} \leq n) - \Pr(X_{l,m} \leq n-1) \\
 &= \prod_{i=1}^n \Pr(X_{l,i} \leq n) - \prod_{i=1}^{n-1} \Pr(X_{l,i} \leq n-1) \\
 &= [f(n)]^v - [f(n-1)]^v
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서,

$$f(n) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{\phi_l} \binom{\phi_l}{j} \bar{\rho}^j (1-\bar{\rho})^{\phi_l-j} & n \geq 0 \\ 0, & n < 0. \end{cases} \tag{7}$$

위 식에 있는 X_{l,m}의 확률 밀도 함수로부터,

$$\begin{aligned}
 \bar{X}_{l,m} &= \sum_{n=0}^{\phi_l} n \cdot P_{l,m}(n) \\
 &= \phi_l \cdot [f(\phi_l)]^v - \sum_{n=0}^{\phi_l-1} [f(n)]^v
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, $\bar{X}_{l,m}$ 는 X_{l,m}의 평균이다. 그러므로, φ_l개의 광섬유에서 파장 λ_m의 평균 사용률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \bar{\rho}_{l,m} &= \frac{\bar{X}_{l,m}}{\phi_l} \\
 &= [f(\phi_l)]^v - \frac{\sum_{n=0}^{\phi_l-1} [f(n)]^v}{\phi_l}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

샘플 공간은 파장의 사용률과 무관하게 결정되므로, φ_l개의 광섬유에서 파장 λ_m의 평균 사용률을 $\bar{\rho}_{l,m}$ 을 φ_g개의 광섬유에서 파장 λ_m의 평균 사용률 $\bar{\rho}_{g,m}$ 에 근사시킨다. 이리하여, 전체 망에서 파장 λ_m을 사용하는 광섬유의 평균 수는 φ_g와 $\bar{\rho}_{l,m}$ 로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \bar{X}_{g,m} &= \phi_g \cdot \bar{\rho}_{g,m} \\
 &\approx \phi_g \left([f(\phi_l)]^v - \frac{\sum_{n=0}^{\phi_l-1} [f(n)]^v}{\phi_l} \right).
 \end{aligned} \tag{10}$$

부분적인 샘플 공간에서 가장 많이 사용되는 파장은 m과 같지 않은 어떤 i에 대하여 $\bar{X}_{g,m}$ 보다 더 큰 값을 가지는 X_{g,i}이 존재할 때, 전체 망에서 가장 많이 사용되는 파장과 다르다. 이리하여 라우팅 경로에서 할당할 수 있는 파장의 수가 주어지면 샘플 공간에서 가장 많이 사용되는 파장이 전체 망에서 가장 많이 사용되는 파장의 수와 같지 않을 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Pr(\exists i \text{ such that } i \neq m \text{ and } X_{g,i} > \bar{X}_{g,m} | V = k) \\
 = 1 - \Pr(X_{g,i} \leq \bar{X}_{g,m} \text{ for all } i (\neq m) | V = k) \\
 = 1 - \left[\sum_{j=0}^{\bar{X}_{g,m}} \binom{\phi_g}{j} \bar{\rho}^j (1-\bar{\rho})^{\phi_g-j} \right]^{k-1}
 \end{aligned} \tag{11}$$

여기서, V는 광 경로의 라우팅 경로에서 할당 가능한 파장의 수를 나타내는 확률 변수이다. 물리적

인 홉 거리가 \bar{h} 인 광 경로를 기준으로 V 의 확률 밀도 함수를 구하면 하나의 파장이 연속적인 \bar{h} 개의 광섬유에서 공통적으로 사용되지 않을 확률은 $(1-\rho)^{\bar{h}}$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr(V = k) = P_v(k) = \binom{W}{k} p^k (1-p)^{W-k} \quad (12)$$

여기서,

$$p = (1-\rho)^{\bar{h}} \quad (13)$$

수식 (11)과 (12)에 의해 부분적으로 가장 많이 사용되는 파장이 전체 망에서 가장 많이 사용되는 파장의 수와 다를 확률은 $(1 - P_d)$ 이며, 이 때 P_d 는 다음과 같다.

$$P_d = \Pr(\exists i \text{ such that } i \neq m \text{ and } X_{g,i} > \bar{X}_{g,m}) \\ = \sum_{k=2}^W \Pr(\exists i \text{ such that } i \neq m \text{ and } X_{g,i} > \bar{X}_{g,m} | V = k) \cdot P_v(k) \quad (14)$$

성능을 분석하기 위하여, 제안된 알고리즘의 블록킹 확률 P_b^{LMU} 는 $(1 - P_d)$ 의 확률로 MU 알고리즘의 블록킹 확률 P_b^{MU} 과 같다고 가정하고 공정한 평가를 위해 P_d 의 확률로 임의의 (random) 파장 할당 알고리즘의 블록킹 확률 P_b^R 과 같다고 가정한다. 따라서, 분석적인 블록킹 확률 P_b^{LMU} 는 다음과 같이 표시된다.

$$P_b^{LMU} = (1 - P_d) \cdot P_b^{MU} + P_d \cdot P_b^R \quad (15)$$

다음 장에서 제안된 알고리즘을 포함한 여러 가지 파장 할당 알고리즘의 성능에 대해 수치적인 비교 결과를 보인다.

IV. 시뮬레이션 및 성능 비교

이 장에서는 $M/M/c/c$ 망 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘과 기존의 휴리스틱 알고리즘을 비교한 블록킹 성능을 제시한다. 여기서는 제안한 알고리즘이 분산 파장 알고리즘 중에서 좋은 성능을 보이는 한편 중앙 집중 제어 방식의 파장할당 알고리즘과 비교하여 거의 비슷한 성능을 나타내는 것을 보여준다.

알고리즘의 성능은 두 개의 서로 다른 망에서 평

간한다. 첫 번째는 10개의 노드를 가지고 있는 단방향 링 망이고, 다른 하나는 양방향 5×5 매쉬-토러스 망이다. 여기서 양방향 링크는 두 개의 단섬유가 서로 반대 방향을 향하고 있는 것을 의미한다. 링 망은 약한 연결 상태를 대표하는 반면, 매쉬-토러스 망은 강한 연결 상태를 가진 망 형태를 대표하므로, 이 두 형태는 망 형태의 일반적인 성질을 평가하는데 사용될 수 있다. 양방향 링 망의 시뮬레이션에서 사용되는 고정 라우팅 알고리즘으로는 [8]에 나와 있는 X-Y 라우팅을 사용한다. 한편, 노드 각각에서 생성되는 콜은 같은 비율 λ 로 주어지는 포외송 프로세스 (Poisson process) 인 동적 트래픽 모델을 사용한다. 각각의 콜은 서로 다른 콜과 독립적이고, 콜의 지속 시간은 평균적으로 $1/\mu$ 을 가지면서 지수적으로 분포한다. 콜 요청이 노드에 도착하였을 때, 그 콜의 목적 노드는 같은 확률을 가지고 다른 노드로 결정된다. 따라서 전체 트래픽은 망에 균일하게 분포된다. 일단 시작 노드와 목적 노드 쌍이 결정되면 콜 설정은 시그널링을 통하여 이미 결정되어진 고정 경로를 통해 이루어지며 경로 상 파장의 사용 상태가 체크된다. 만약 경로 상에서 모든 링크에서 공통적으로 사용할 수 있는 파장이 하나 이상 존재할 경우, 그 중 한 개의 파장이 파장 할당 알고리즘을 통하여 이루어진다. 만일 사용 가능한 파장이 없을 경우 콜은 막힌다. 10^6 개 이상의 콜이 생성되었고 통계 결과는 망이 평형상태 (steady state)에 도달한 후에 모아졌다. 제안한 알고리즘과 비교할 휴리스틱 파장 할당 알고리즘들은 다음과 같다.

- 1) Random(R): 사용 가능한 파장 집합 중에서 임의의 파장을 할당한다. 이 알고리즘은 모든 파장에 부하(load)를 분산시키는 성질을 가지고 있어서, 각각의 파장은 거의 동일한 이용률을 나타낸다.^[8]
- 2) First-Fit(FF): 파장은 오름차순으로 인덱스(indexing)된다. 사용 가능한 파장들의 집합 중에서 가장 인덱스 숫자가 낮은 파장을 골라서 할당한다.^{[1],[8]}
- 3) Most-Used(MU): 전체 망에서 가장 많이 사용되는 파장을 골라서 할당한다.

제안한 알고리즘을 포함한 위 알고리즘들은 여러 가지 범주로 나누어 볼 수 있다. 우선 이 알고리즘들은 스프레딩(spreading) 타입과 패킹(packing) 타입의 알고리즘으로 나눌 수 있다. 1)의 경우는 스

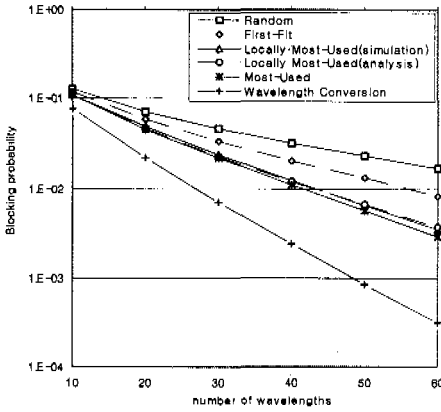


그림 3. 10-노드 단 방향 링 망에서의 P_b vs. 파장의 개수, 부하/파장/링크 = 0.6 [Erlangs]

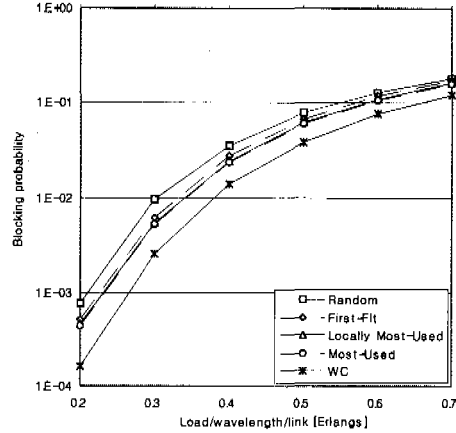


그림 5. 10-노드 단 방향 링 망에서의 P_b vs. 부하

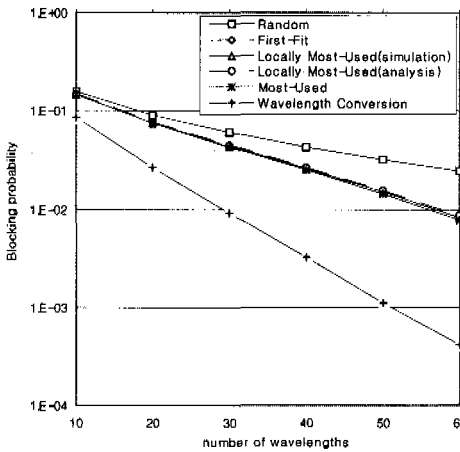


그림 4. 양방향 5x5 메쉬-토러스 망에서의 P_b vs. 파장의 개수, 부하/파장/링크 = 0.625 [Erlangs]

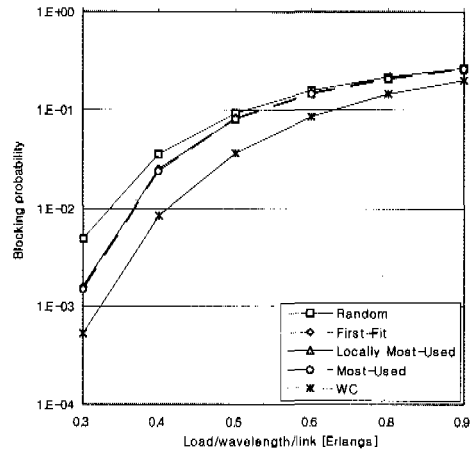


그림 6. 양방향 5x5 메쉬-토러스 망에서의 P_b vs. 부하

프레딩 타입의 알고리즘에 해당하는 반면, 2), 3), 그리고 제안한 알고리즘은 패킹 타입의 알고리즘에 해당한다. 여러 논문에서 패킹 타입의 알고리즘들이 블록킹의 측면에서 스프레딩 타입의 알고리즘들의 성능을 능가하는 것으로 연구되어 있다. 패킹 타입의 알고리즘들은 부하가 적은 숫자의 파장에 넣음으로써 남은 파장의 점유되지 않은 용량이 새로운 콜 요청 시 사용 가능하도록 한다. 또 다른 방법으로는 중앙 집중식 제어를 필요로 하는 것들과, 분산 제어를 필요로 하는 알고리즘으로 나누어 볼 수 있다. 1), 2)와 제안한 알고리즘은 분산적인 형태로 동작하지만, 3)은 전체 망에서 링크의 사용 상태에 대해 알고 있어야 하기 때문에 중앙 집중식 형태로 동작하여야 한다.

그림 3과 4에서는 단 방향 링 망과 양방향 메쉬-토러스 망에서 파장의 개수에 따른 블록킹 확률을 도시하였다. 또한 비교를 위하여 파장 변환 능력이 있는 망의 블록킹 확률을 함께 도시하였다. 여기서 LMU가 FF나 random 알고리즘보다 낮은 블록킹 확률을 가지고 있음을 관찰할 수 있다. LMU는 MU 알고리즘과 비교했을 때 거의 같은 성능을 나타낸다. LMU와 FF 알고리즘의 차이는 단 방향 링 망에서 더욱 뚜렷하게 나타나는 반면, 양방향 메쉬-토러스 망에서는 그 차이가 근소하다. 단 방향 링 망에서 LMU 알고리즘이 시작 노드로 들어오는 링크와 목적 노드에서 나가는 단지 두 개의 링크의 사용 상태만 본다는 사실을 고려하면, 이러한 비슷한 성능 결과는 굉장히 만족스러운 것으로 여겨질

수 있다.

그림 5와 6은 트래픽 부하에 따른 블록킹 확률을 도식한 것이다. 여기에서는 그림 3과 4에서 나타난 것과 같은 경향을 보여준다. 단방향 링 망에서는 MU와 LMU 알고리즘이 FF 알고리즘보다 약간 좋은 성능을 나타내지만 양방향 매쉬-토러스 망에서는 위 세 가지 알고리즘들의 성능 차이를 구별할 수가 없다.

마지막으로, LMU 알고리즘의 분석 결과를 시뮬레이션 결과와 함께 그림 3과 4에 같이 도시하였다. 분석 결과는 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 보여준다. 분석에서 얻어진 블록킹 확률이 시뮬레이션에서 얻어진 블록킹 확률보다 약간 높게 나오지만 그 차이는 무시할 정도이다. 분석에서 예상하였듯이 LMU 알고리즘의 성능은 random 알고리즘보다 MU 알고리즘에 가깝게 나타나고 그래프에서도 도시한 바와 같이 그러함을 알 수 있다. 이러한 결과들은 LMU 알고리즘이 전체 망에서가 아니라 샘플 공간에서 나온 망 상태에 대한 정보만으로 충분히 라우팅 경로에 파장을 할당할 수 있음을 보여주며, 그 결과로 분산 제어를 가능하게 하는 길을 열어주는 것을 암시한다.

V. 결론

본 논문에서는 분산 제어 방식의 동적 파장 할당 알고리즘을 제안하였다. 중앙 집중식 제어 방식인 기존의 MU 알고리즘과 비교하여 제안된 알고리즘의 블록킹 성능을 분석하였다. $M/M/c/c$ 의 동적 트래픽 모델을 사용하는 시뮬레이션을 통하여 분석적인 결과가 시뮬레이션 결과에 잘 맞음과 제안된 알고리즘이 분산 제어 방식임에도 불구하고 중앙 집중식 제어 방식의 MU 알고리즘과 거의 같은 블록킹 성능을 가지고 있음을 보였다. 제안된 알고리즘은 이전에 제안된 중앙 집중식 제어 방식의 알고리즘보다 훨씬 작은 제어 트래픽 부하와 계산상의 복잡도를 가지므로, 파장 분할 다중화 망이 많은 노드를 가지는 경우에 적합하다. 특히, 제안된 알고리즘은 고정 라우팅 경로 상에서 기존의 분산 제어 방식의 FF 알고리즘 [1], [8] 보다 더 좋은 블록킹 성능을 보여준다. FF 알고리즘에 대한 성능 개선은 양방향 매쉬-토러스 구조보다는 단방향 링 구조에서 더욱더 현저하게 나타났는데, 이것은 단방향 링 구조의 제안된 연결성에 의하여 특정 파장이 라우팅 경로 근처의 부분적인 영역에서 집중적으로 사용되

기 때문에 (packing effect) 망 전체 측면에서 파장 사용의 효율성이 증가하였기 때문이다. 결론적으로, 제안된 알고리즘은 파장 분할 다중화 망에서 효율적인 분산 제어 방식의 파장 할당 방식이다.

참고 문헌

- [1] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive wavelength routing in all-optical networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 197-206, April 1998.
- [2] B. Mukherjee, *Optical Communication Networks*, New York: McGraw-Hill, 1997.
- [3] R. Ramaswami, *Optical Networks: A Practical Perspective*, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [4] R. A. Barry and P. A. Humblet, "Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changers," *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, vol. 14, no. 5, pp. 858-867, June 1996.
- [5] A. Birman, "Computing approximate blocking probabilities for a class of all-optical networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol. 14, no. 5, pp. 852-857, June 1996.
- [6] Yuhong Zhu, George N. Rouskas, and Harry G. Perros, "Blocking in wavelength routing networks, part I: the single path case," in *Proc. IEEE INFOCOM'99*, pp. 321-328, 1999.
- [7] S. Subramaniam and R. A. Barry, "Wavelength assignment in fixed routing WDM networks," in *Proc. IEEE ICC'97*, pp. 406-410, 1997.
- [8] M. Kovačević and A. S. Acampora, "Benefits of wavelength translation in all-optical clear channel networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol. 14, no. 5, pp. 780-799, June 1996.
- [9] Imrich Chlamtac and Tao Zhang, "Lightpath (wavelength) routing in large WDM networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol. 14, no. 5, pp. 909-913, June 1996.
- [10] Rajiv Ramaswami and Kumer N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol. 14, no. 5, pp.

840-851, June 1996.

- [11] Z. Zhang and A. S. Acampora, "A heuristic wavelength assignment algorithm for multihop WDM networks with wavelength routing and wavelength re-use," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 3, no. 5, pp. 281-288, June 1995.
- [12] Rajiv Ramaswami and Kumer N. Sivarajan, "Routing and wavelength assignment in all-optical networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 3, no. 5, pp. 489-500, Oct. 1995.
- [13] Aura Ganz and Xudong Wang, "Efficient algorithm for virtual topology design in multihop lightwave networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 2, no. 3, pp. 217-225, June 1994.
- [14] D. Banerjee, B. Mukherjee, and S. Ramamurthy, "The multidimensional torus: analysis of average hop distance and application as a multihop lightwave network," in *Proc. IEEE ICC'94, 1994*.
- [15] Ezhan Karasan and Ender Ayanoglu, "Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 6, no. 2, April 1998.

이 쌍 수(Ssang-soo Lee)



1988년 2월 : 서울대학교
제어계측공학과 졸업
1990년 2월 : 서울대학교
제어계측공학과 석사
1990년 1월~현재 : (주) LG전자
DTV연구소 책임연구원(보)

1998년 3월~현재 : 서울대학교 전기공학부 박사과정
<주관심 분야> 광 통신망(WDM), 무선 통신, CDMA

이 창 형(Chang-hyung Lee)



1997년 2월 : 서울대학교
전기공학부 졸업
1997년 3월~현재 : 서울대학교
전기공학부 석사과정
<주관심 분야>
광 통신망(WDM)

서 승 우(Seung-woo Seo)

정희원



1987년 2월 : 서울대학교
전기공학과 졸업
1989년 2월 : 서울대학교
전기 공학과 석사
1990년 3월~1991년 6월 :
서울대학교 기초전력
연구소 및 제어계측
공학과 연구원

1993년 12월 : 미국 펜실베니아 주립대학교 전기공
학과 박사
1993년 8월~1994년 7월 : 미국 펜실베니아 주립대
학 전산기공학과 조교수
1994년 8월~1996년 7월 : 미국 프린스턴대학 전기
공학과 및 POEM연구소 연구원(미국
과학 재단 선발 연구원)
1996년 9월~현재 : 서울대학교 전기공학부 조교수
<주관심 분야> 고속 통신망, 광 통신망, 유/무선 교
환 시스템

장 문 종(Moon-Jong Jang)



1995년 2월 : 경북대학교
컴퓨터공학과 졸업
1997년 2월 : 한국과학기술원
전자전산학과 석사
1997년 1월~현재 :
한전전력연구원
일반연구원

<주관심 분야> 프로그래밍 언어, 전광전송망, 통신
망 관리